

НАУКА и ТЕХНИКА



Science and Technique V. 18, No 4
(2019)

Международный
научно-технический журнал

International
Scientific and Technical Journal

Серия 2. Строительство
Серия 3. Электронные системы

Series 2. Civil and Industrial Engineering
Series 3. Electronic Systems

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

Published from January 2002
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

- Ковалев Я. Н., Александров Д. Ю.**
Концептуальные основы технологии песчаного
дисперсно-армированного асфальтобетона 269
- Босаков С. В., Скачёк П. Д.**
Решение контактной задачи для узла опирания
балочной шарнирно опертой плиты 274
- Leonovich S. N., Shalyi E. E., Kim L. V.**
Reinforced Concrete under the Action
of Carbonization and Chloride Aggression:
a Probabilistic Model for Service Life Prediction
(Леонович С. Н., Шалый Е. Е., Ким Л. В.
Железобетон при воздействии карбонизации
и хлоридной агрессии: вероятностная модель
расчета-прогноза срока службы) 284
- Мордич М. М.**
Технология и физико-механические свойства
керамзитопенобетона для монолитного
и сборного строительства 292
- Юхневский П. И., Димитриади Н. П.**
О синергетическом влиянии смазки
и химических добавок на получение
качественной поверхности бетонных изделий . . . 303

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

- Kovalev Ya. N., Alexandrov D. Yu.**
Conceptual Fundamentals for Technology
of Sand Disperse-Reinforced Asphalt Concrete 269
- Bosakov S. V., Skachok P. D.**
Solution of Contact Problem for Supporting
Node of Beam Hinged Plate 274
- Leonovich S. N., Shalyi E. E., Kim L. V.**
Reinforced Concrete under the Action
of Carbonization and Chloride Aggression:
a Probabilistic Model for Service Life Prediction . . . 284
- Mordzich M. M.**
Technology and Physico-Mechanical Properties
of Claydite Foam Concrete for Monolithic
and Prefabricated Construction 292
- Yukhnevskiy P. I., Dimitriadi N. P.**
About Synergistic Effect of Lubricant
and Chemical Additives on Obtaining Quality
Surface of Concrete Products. 303

Bulakh I. V. Common Features of Architectural Design of the Medical Purpose Building (Булах И. В. Общие особенности архитектурного проектирования зданий медицинского назначения)	311
Полевод И. И., Жамойдик С. М., Нехань Д. С., Батан Д. С. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона	319
Гуриненко Н. С., Батяновский Э. И. Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона	330

Электронные системы

Попова Ю. Б. Автоматизированная система управления обучением CATS.	339
Гурский Н. Н., Скудняков Ю. А., Артющик В. С., Безручко А. Н. Управление мехатронной системой на базе многозвенных роботов-манипуляторов	350

**Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv**

Редакционная коллегия

- В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. 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),

Bulakh I. V. Common Features of Architectural Design of the Medical Purpose Building	311
---	-----

Palevoda I. I., Zhamoidzik S. M., Nekhan D. S., Batan D. S. Study of Physical and Mechanical Properties of Centrifuged Concrete	319
Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete	330

Electronic Systems

Popova Yu. B. Learning Management System CATS	339
Hurski N. N., Skudnyakov Y. A., Artsiushchik V. S., Bezruchko A. N. Control of Mechatronic System Based on Multilink Robot-Manipulators	350

**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),

П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 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 национальный технический 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),

P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 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 National Technical 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)

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

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

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

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

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 31.07.2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,25. 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, 2019

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanichy

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

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-269-273>

УДК 691.168

Концептуальные основы технологии песчаного дисперсно-армированного асфальтобетона

Докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾, инж. Д. Ю. Александров²⁾

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Проблема эффективного использования ресурсов в дорожной отрасли остается одной из самых сложных, поэтому требуется интенсификация процесса исследования возможностей производства дорожно-строительных материалов пониженной ресурсоемкости с повышенными физико-механическими свойствами. Техногенные отходы предприятий Беларуси достаточно разнообразны, и необходимо их изучение. Использование методов ИК-спектрометрии, зондовой микроскопии, изучение геометрических характеристик частиц и волокон позволяют определить наиболее активные центры и выявить микродефекты, влияющие на прочность адгезионной связи на границе «волокно – вяжущее» и физико-механические свойства готового асфальтобетона. Природа базальтового волокна предполагает в основном физический характер адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз. Повышение активности техногенного отхода с целью усиления адгезионных контактов вплоть до хемосорбционного уровня возможно только при предварительной обработке волокна, которая будет включать очистку, удаление инородных включений, травление волокна, сушку, возможную сортировку и впусивание. Промышленная апробация такого технологического процесса невозможна без разработки соответствующего модуля или установки. Дисперсное армирование вызывает изменения в составах и технологии песчаного асфальтобетона. Увеличение удельной поверхности заполнителя, необходимость равномерного распределения волокна по объему определяют потребность в вяжущем, порядок и режимы перемешивания компонентов. Зерновой состав заполнителя может быть представлен как отсевом дробления, так и природным песком или смесью этих материалов. Требования к свойствам песчаного дисперсно-армированного асфальтобетона формируются в зависимости от условий эксплуатации и расположения слоя этого материала в конструкции дорожной одежды. Дисперсно-армированный песчаный асфальтобетон может выполнять функции сверхтонкого защитного слоя, выравнивающего слоя или трещинопрерывающей прослойки, слоя, устойчивого к усталостному трещинообразованию.

Ключевые слова: песчаный асфальтобетон, дисперсное волокно, техногенные отходы, активация волокна, промышленный модуль

Для цитирования: Ковалев, Я. Н. Концептуальные основы технологии песчаного дисперсно-армированного асфальтобетона / Я. Н. Ковалев, Д. Ю. Александров // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 269–273. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-269-273>

Conceptual Fundamentals for Technology of Sand Disperse-Reinforced Asphalt Concrete

Ya. N. Kovalev¹⁾, D. Yu. Alexandrov²⁾

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

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

Abstract. A problem of efficient resource usage in road branch continues to be one of the most complicated issues and requires an intensification in investigation process pertaining to possibilities for production of road construction materials

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

of low resource intensity with high physical and mechanical properties. Technogenic wastes of the Belarusian enterprises are rather various and they need a detailed investigation. Application of such methods as IR spectrometry, probe microscopy, study of geometric characteristics of particles and fibers make it possible to determine more active centres and reveal micro-defects that influence on strength of adhesion bond at the boundary of “fiber – binder” and physical and mechanical properties of ready-mixed asphalt concrete. Nature of basalt fiber presupposes mainly physical character of adhesion interaction at the boundary of phase separation. An increase of technogenic waste activity to enhance adhesion contacts up to chemisorption level is possible only due to preliminary fiber processing which includes cleaning, removal of foreign inclusions, etching, drying, probable sorting-out and fluffing. Industrial approbation of such technological process is not possible without development of a corresponding module or a plant. Disperse reinforcement causes changes in composition and technology of sand asphalt concrete. An increase in specific surface of an aggregate, necessity of uniform distribution of fiber in terms of volume determine the required need in a binder, procedure and regimes for component mixing. Grain composition of the aggregate can be represented by crush screening and natural sand of mixture of these materials. Requirements to properties of sand disperse-reinforced asphalt concrete are formed on the basis of operational conditions and layer arrangement of the material in the design of a surface dressing. The disperse-reinforced sand asphalt concrete can perform functions of a superfine protective layer, a levelling layer or a crack stopping layer which is resistant to fatigue crack formation.

Keywords: sand asphalt concrete, disperse fiber, technogenic wastes, fiber activation, industrial modul

For citation: Kovalev Ya. N., Alexandrov D. Yu. (2019) Conceptual Fundamentals for Technology of Sand Disperse-Reinforced Asphalt Concrete. *Science and Technique*. 18 (4), 269–273. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-269-273> (in Russian)

Введение

Техногенные отходы различного происхождения и вида неоднократно применялись в дорожной отрасли [1]: молотые отработанные формовочные смеси являются эффективным заменителем минерального порошка; трибоактивация кварцевого природного песка практически в два раза повышает сдвигустойчивость песчаного асфальтобетона; модификация битумов полиэтиленовыми отходами увеличивает прочностные качества асфальтобетонов и т. д. Однако все исследователи, изучающие возможности практической реализации технологий модифицирования асфальтобетонов отходами промышленности, сталкиваются с проблемами подготовки этих материалов и регионального характера их применения в таких асфальтобетонах. Региональный характер выражается в отличиях одинаковых типов отходов в зависимости от особенностей производств и исходных компонентов изготавливаемого основного продукта, а также эффективности, определяющейся дальностью транспортировки отхода. С другой стороны, в Беларуси образовалось достаточное количество невостребованного отсева дробления (РУПП «Гранит»), а наиболее распространенным местным материалом является природный кварцевый песок. Это позволяет рассмотреть вопрос о возможности широкого использования в дорожной отрасли песчаного асфальтобетона, модифицированного отходами производств. В статье в качестве техногенного отхода для песчаного асфальтобетона рассматри-

ваются отходы производства минераловатных плит ОАО «Гомельстройматериалы», которые ежегодно образуются в объеме более 10 тыс. т.

Условия работы дорожного асфальтобетона

Условия работы асфальтобетона в покрытии позволяют сформировать требования к его свойствам и на этапе проектирования состава смеси эффективно ими управлять. Максимальные значения сжимающих напряжений наблюдаются в поверхностном слое дорожных асфальтобетонных покрытий, максимальные сдвигающие – на глубине до 3–4 см, а максимальные растягивающие – по подошве слоя покрытия. Существующий нормативный документ [2] содержит обобщенные требования к физико-механическим показателям плотных асфальтобетонов и не учитывает возможные варианты их применения. Не одно десятилетие концептуальную модель применения песчаного асфальтобетона можно было выразить следующей фразой: «песчаный асфальтобетон – верхний несущий слой дорожной одежды». Результаты исследований подтвердили несостоятельность такой концептуальной модели, а теоретические представления не соотносились с реальными результатами. Практически реализуемая технология производства и укладки асфальтобетонных смесей не позволяет значительно уменьшить количество битума в песчаной смеси, что необходимо для повышения прочностных качеств песчаного асфальтобетона.

Теоретически любому материалу можно найти область применения, в которой в полной мере реализуются его достоинства. Песчаный асфальтобетон обладает высокой плотностью, однородностью, хорошими сцепными качествами (при использовании отсева дробления), коррозионной стойкостью к воздействию солей [3], а также повышенной усталостной долговечностью по сравнению с другими плотными асфальтобетонами [4]. Для эффективного использования песчаных асфальтобетонов необходимо существенно изменить условия их работы: максимально удалить слой асфальтобетона от воздействия подвижной нагрузки или снизить величину сдвигающих напряжений в слое. Первый вариант реализуется, если использовать песчаный асфальтобетон в качестве трещинопрерывающей, демпфирующей прослойки, или нижнего слоя конструкции дорожной одежды с оптимальным распределением напряжений. Второй вариант может быть реализован при максимальном уменьшении толщины и использовании асфальтобетона в качестве сверхтонкого защитного слоя, который будет иметь преимущества перед конкурирующими технологиями [5]. Однако в любом случае технология и состав песчаных асфальтобетонов требуют существенных изменений: необходимы дисперсное армирование [6], вибрационное перемешивание, газовая технология и т. д.

Свойства базальтовых волокон

Предлагаемый исследуемый отход можно разделить на две группы. Первая – это не вытянувшиеся капли расплава (корольки), образующиеся в процессе волокнообразования на барабане камеры волокноосаждения (рис. 1). Вторая – волокна от боковой обрезки, получаемые на этапе резки ковра. Отход обоих видов

хранится под открытым небом. Ежегодно образуется около 12–13 тыс. т отходов минеральных волокон.

Свойства отхода исследованы с использованием оборудования Белорусского республиканского центра зондовой микроскопии (Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси). Отход исследовался методами спектроскопии и оптической микроскопии. При расшифровке ИК-спектров волокна и корольков, ввиду многокомпонентного состава, технологии производства и других факторов, были использованы сравнительные данные, полученные для сходных образцов [7, 8]. Для спектрального анализа дисперсного базальтового волокна применялся спектрометр с преобразованием Фурье (NICOLET 5700 FT-IR). Наиболее интенсивные полосы поглощения относятся к областям волн $600\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, меньшие – к $1200\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ (рис. 2). Полосы поглощения в первом диапазоне волновых чисел соответствуют колебаниям атомов кремния и кислорода, во втором диапазоне – валентным колебаниям Me-O-H -связей. ИК-спектр корольков имеет сходные очертания.

Поверхность волокна, изученная при помощи оптического микроскопа, ровная и гладкая (рис. 3). Дефектных мест на поверхности волокна не обнаружено. Средний диаметр волокна в пределах $5\text{--}10\text{ мкм}$. Среднюю длину волокна определить невозможно (волокна имеют различную длину) и, как следствие, соотношение их диаметра к длине тоже. Исследование поверхности волокна и корольков проводилось с использованием оптического микроскопа Olympus BX41, оборудованного цифровой видеокamerой. Методы оптической микроскопии не требуют специальной подготовки волокна.

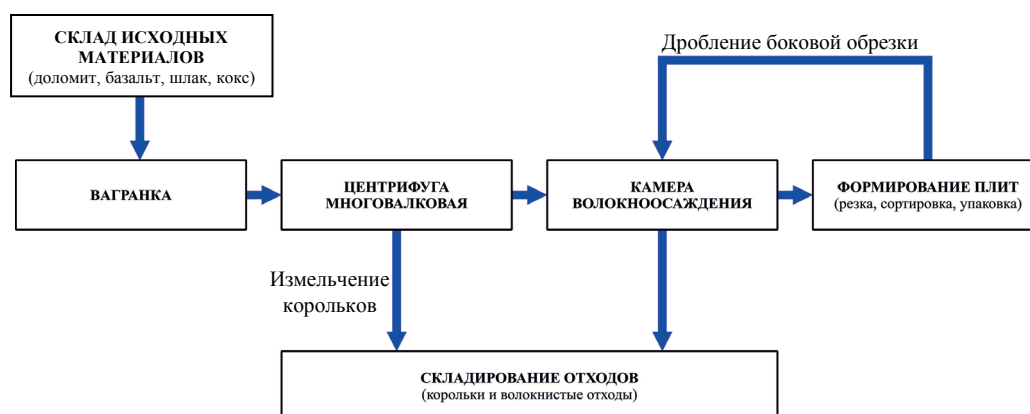


Рис. 1. Упрощенная схема образования отхода производства минераловатных плит

Fig. 1. Simplified diagram of waste formation during manufacturing of mineral wool plates



Рис. 2. ИК-спектр базальтового волокна

Fig. 2. IR-spectrum of basalt fibre

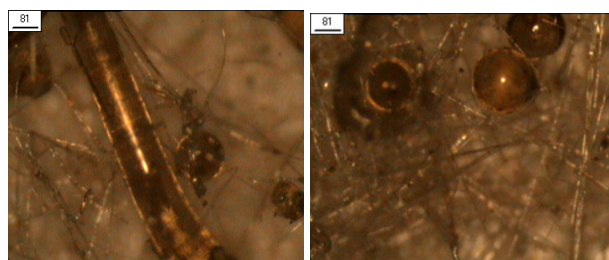


Рис. 3. Микрофотография базальтового волокна

Fig. 3. Microphotography of basalt fibre

Многokrатное увеличение обеспечивается наличием нескольких объективов. Проводить более детальные исследования методами микроскопии нецелесообразно, так как уже на этом этапе подтвердились предположения о морфологии поверхности волокна.

Подготовка волокна и технология асфальтобетона

Для песчаного асфальтобетона идеальной является структура с максимальным сближением зерен минерального материала при оптимальной толщине битумной пленки. Дисперсные волокна в таком материале должны быть равномерно распределены по объему асфальто вяжущего. Волокна должны быть разделены, недопустимо образование пучков и кластеров, не обработанных вяжущим. В этом случае при воздействии силы в любом направлении микроарматура будет способствовать повышению физико-механических свойств песчаного асфальтобетона.

Технология получения песчаного асфальтобетона достаточно проста и экономически эффективна, но приводит к повышенному расходу битума за счет увеличения его неструктурированной составляющей. Нагрев вяжущего до рабочей температуры (140–170) °C хоть и снижает величину поверхностного натяжения битума, но не позволяет уменьшить вязкость для быстрой и равномерной обработки всей удельной поверхности минерального заполнителя. Совершенствование предлагаемой технологии песчаного асфальтобетона в оптимальном виде включа-

ет следующие этапы: подготовку волокна, приготовление смеси минерального порошка и модифицированных волокон, приготовление комплексного асфальто вяжущего, смешение асфальто вяжущего и минерального заполнителя (песка или отсева камнедробления).

Этап подготовки волокна предназначен для очистки его от загрязняющих включений (так как он хранится под открытым небом), разделения отхода на волокна и корольки (при необходимости), травления волокна и его сушки. Промышленная установка должна иметь рабочую камеру, в которой в различных жидких средах при помощи сменного оборудования производится подготовка волокна (рис. 4). Травление базальтового волокна различных композиционных материалов – достаточно распространенный процесс [7–9], цель которого – создание на поверхности волокна активных центров, интенсивно взаимодействующих с вяжущим, или защитной пленки, препятствующей разрушению волокна в процессе приготовления и эксплуатации композита. Для дисперсного армирования песчаного асфальтобетона исследования подобного рода не проводились. Можно предположить, что травление в известковом растворе [7] в некоторой степени улучшит смачивание волокна вяжущим. Вторым важным технологическим решением является приготовление смеси минерального порошка и вспушенного дисперсного волокна [10] в этой же установке.

Приготовленная смесь волокна и минерального порошка на следующем этапе смешивается с вяжущим. Подобная двухступенчатая технология приготовления асфальтобетона, согласно результатам исследования [11], позволяет снизить потребность в битуме на 10 % (для традиционных песчаных асфальтобетонных). Для дисперсно-армированных асфальтобетонных двухступенчатая технология приготовления еще не применялась. Увеличение площади удельной поверхности смеси минерального порошка и волокна вызывает необходимость в дополнительном воздействии на компоненты асфальто вяжущего в камере смесителя. Для дисперсных систем возможен подход [12] с использованием вибрационных воздействий на его компоненты: в вибрационный смеситель поступает смесь порошка и волокна, где при воздействии колебаний она переходит в псевдокипящее состояние, а последующая подача битума в этот смеситель (при непрерывающихся колебаниях) приводит к снижению его вязкости и лучшему обволакиванию при меньших расходах битума. Впоследствии асфальто вяжущее перемешивается с песком в смесителе асфальтобетонного завода.

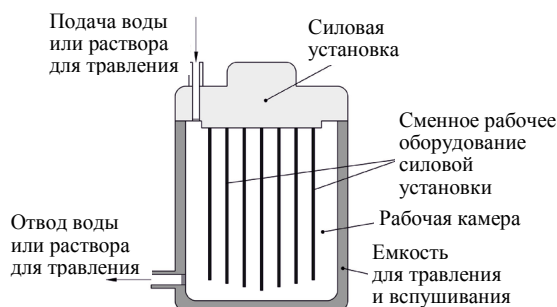


Рис. 4. Принципиальная схема установки для подготовки волокна

Fig. 4. Principal diagram of plant for fibre preparation

ВЫВОДЫ

1. Существующая технология песчаного асфальтобетона не позволяет в полной мере реализовать предложенные теоретические положения для организации однородной структуры дисперсной системы. При изменении условий работы песчаного асфальтобетона в покрытии отпадает необходимость в повышении всех его физико-механических характеристик.

2. Введение дисперсного волокна в состав песчаного асфальтобетона сопряжено с необходимостью очистки его от примесей и загрязнений, разделения на группы специальной обработки активатором для улучшения смачивания. Такая последовательность может быть реализована в производственных условиях только после разработки универсального (для данной группы отходов) промышленного модуля.

3. Раздельное приготовление асфальто вяжущего и последующее его смешение с песком снижают потребность в битуме без ухудшения свойств асфальтобетона. Во избежание образования кластеров необработанное вяжущим дисперсное волокно необходимо предварительно смешивать с минеральным порошком при воздействии вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев, Я. Н. Активационные технологии дорожных композиционных материалов: науч.-практ. основы / Я. Н. Ковалев. Минск: Бел. энцикл., 2002. 334 с.
2. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия: СТБ 1033–2016. Минск: Госстандарт, 2016. 27 с.
3. Прочность и долговечность асфальтобетона / Б. И. Ладугин [и др.]. Минск: Наука и техника, 1972. 285 с.
4. Илиополов, С. К. Долговечность асфальтобетонных покрытий в условиях роста динамического воздействия транспортных средств / С. К. Илиополов, Е. В. Углова. М.: Информавтодор, 2007. 84 с.
5. Александров, Д. Ю. Совершенствование состава и технологии приготовления песчаных асфальтобетонов / Д. Ю. Александров // Техника и технологии строительства. 2015. № 2. С. 6–10.
6. Акулич, А. В. Структура и свойства дисперсно-армированных асфальтобетонов / А. В. Акулич. Минск: Белорус. политех. ин-т, 1987. 17 с.

7. Рыбин, В. А. Физико-химическое исследование базальтового волокна с защитными щелочестойкими покрытиями / В. А. Рыбин. Новосибирск, 2016. 143 с.
8. Кузьмин, К. Л. Влияние химического состава и поверхностной модификации на механические свойства алюмосиликатных волокон / К. Л. Кузьмин. М.: МГУ, 2017. 25 с.
9. CVD-Grown CNTs on Basalt Fiber Surfaces for Multifunctional Composite Interphases / T. Förster [et al.] // *Fibers*. 2016. Vol. 4, No 28. <https://doi.org/10.3390/fib4040028>.
10. Полякова, С. В. Дисперсно-армированный асфальтобетон с применением синтетических волокон / С. В. Полякова // Дороги и мосты. 2012. Вып. 28. С. 247–260.
11. Ларина, Т. А. Двухступенчатая технология песчаного асфальтобетона / Т. А. Ларина. М.: Гос. всесоюз. дорНИИ, 1989. 21 с.
12. Урьев, Н. Б. Физико-химические основы интенсификации технологических процессов в дисперсных системах / Н. Б. Урьев. М.: Знание, 1980. 64 с.

Поступила 20.12.2018

Подписана в печать 26.02.2019

Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Kovalev Ya. N. (2002) *Activation Technology of Road Composite Materials: Scientific-Practical Fundamentals*. Minsk, Publishing House "Belorusskaya Entsiklopedia". 334 (in Russian).
2. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1033–2016. *Bitumen-Concrete Road, Airdrome Mixes and Bitumen Concrete. Technical Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ. 27 (in Russian).
3. Ladygin B. I., Yatsevich I. K., Vdovichenko S. L., Derkachenko I. L., Zolotarev V. A., Kovalev Ya. N., Korolev I. V., Kudelko M. Ya., Kupriyanchik A. A., Semashko N. S., Strizhevskii V. A., Shumchik K. F. (1972) *Strength and Longevity of Bitumen Concrete*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 285 (in Russian).
4. Iliopolov S. K., Uglova E. V. (2007) *Longevity of Asphalt-Concrete under Conditions of Dynamic Impact Growth of Transport Facilities*. Moscow, Informavtodor Publ. 84 (in Russian).
5. Alexandrov D. Yu. (2015) Improvement of Composition and Technology for Preparation of Sand Asphalt Concrete. *Tekhnika i Tekhnologii Stroitelstva* [Equipment and Technology of Construction], (2), 6–10 (in Russian).
6. Akulich A. V. (1987) *Structure and Properties of Fiber Reinforced Asphalt Concrete*. Minsk, Belarusian Polytechnic Institute. 17 (in Russian).
7. Rybin V. A. (2016) *Physical and Chemical Study of Basalt Fiber with Protective Alkali-Resistant Coatings*. Novosibirsk. 143 (in Russian).
8. Kuzmin K. L. (2017) Influence of Chemical Composition and Surface Modification on Mechanical Properties of Alumina-Silicate Fibers. Moscow, Moscow State University. 25 (in Russian).
9. Förster T., Bin Hao, Mäder E., Simon F., Wölfel E., Peng-Cheng Ma (2016) CVD-Grown CNTs on Basalt Fiber Surfaces for Multifunctional Composite Interphases. *Fibers*, 4 (28). <https://doi.org/10.3390/fib4040028>.
10. Polyakova S. V. (2012) Fiber Reinforced Asphalt Concrete while Using Synthetic Fibers. *Dorogi i Mosty* [Roads and Bridges], (28), 247–260 (in Russian).
11. Larina T. A. (1989) *Two-Stage Technology of Sand Asphalt Concrete*. Moscow, State All-Union Road Research Institute. 21 (in Russian).
12. Uriev N. B. (1980) *Physical and Chemical Intensification of Technological Processes in Disperse Systems*. Moscow, Znanie Publ. 64 (in Russian).

Received: 20.12.2018

Accepted: 26.02.2019

Published online: 31.07.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-274-283>

УДК 539.3

Решение контактной задачи для узла опирания балочной шарнирно опертой плиты

Докт. техн. наук, проф. С. В. Босаков¹⁾, асп. П. Д. Скачёк¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассматривается решение контактной задачи для шарнирного узла опирания балочной плиты перекрытия (покрытия). Основная цель заключается в определении напряженного состояния области опирания плиты на стену. При этом решаются задачи построения эпюры реактивных давлений в области непосредственного контакта плиты и стены, уточнения расчетного пролета плиты, влияния размера зоны контакта на величину максимального изгибающего момента в середине плиты, определения области контакта при различных показателях гибкости и сравнения полученных результатов с известным решением взаимодействия жесткого штампа и упругой четвертьплоскости. Расчет ведется методом Б. Н. Жемочкина, реализация которого для данной задачи соответствует смешанному методу строительной механики. В качестве примера расчет выполняется на сосредоточенную нагрузку, приложенную в середине пролета плиты. В ходе исследования установлено, что при опирании железобетонной плиты как на бетонную стену, так и на кирпичную зона контакта сводится к двум участкам Жемочкина. При уменьшении показателя гибкости, что соответствует опиранию плиты на менее жесткое основание, возрастает контактная область, что, в свою очередь, влияет на увеличение расчетного пролета плиты и изгибающего момента в середине плиты. В случае опирания абсолютно жесткой плиты (показатель гибкости равен нулю) контактные напряжения достигают своего максимума в месте контакта края плиты и упругой четвертьплоскости. Характер эпюры подтверждается аналитической зависимостью распределения контактных напряжений, полученной В. М. Александровым при решении задачи о вдавливании жесткого штампа в грань упругого клина.

Ключевые слова: контактная задача, метод Б. Н. Жемочкина, упругая четвертьплоскость, узел опирания, шарнирно опертая плита, показатель гибкости

Для цитирования: Босаков, С. В. Решение контактной задачи для узла опирания балочной шарнирно опертой плиты / С. В. Босаков, П. Д. Скачёк // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 274–283. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-274-283>

Solution of Contact Problem for Supporting Node of Beam Hinged Plate

S. V. Bosakov¹⁾, P. D. Skachok¹⁾

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

Abstract. The paper considers a solution of contact problem for hinged supporting node of beam floor slab (coating). The main goal is to determine a stress state of the area where a plate rests on the wall. In this case, a number of problems are solved: construction of reactive pressure diagrams in the area of direct plate and wall contact, clarification of the calculated plate span, influence of contact zone size on a value of maximum bending moment in the middle of the plate, determination of contact area at various indices of flexibility and comparison of the obtained results with the known solution of rigid stamp and elastic quarter-plane interaction. The calculation has been carried out by the Zhemochkin method, its implementation for

Адрес для переписки

Босаков Сергей Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Bosakov Siarhei V.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

the given task corresponds to a mixed method of structural mechanics. As an illustration, the calculation has been performed on a concentrated load applied in the middle of the plate span. In the course of the study, it has been established that when a reinforced concrete slab rests on concrete and brick walls, the contact zone reduces itself to two Zhemochkin sections. When a flexibility index is decreased that corresponds to slab support on a less rigid base, the contact area is increased, and that, in its turn, has an influence on an increase of the calculated slab span and the bending moment in the middle of the slab. In the case of an absolutely rigid plate support (flexibility index is equal to zero), the contact stresses reach their maximum value at the point of plate edge contact and elastic quarter-plane. The nature of the diagram is confirmed by an analytical dependence of contact stress distribution obtained by Aleksandrov V. M. when solving a problem of pressing a rigid stamp into an edge of an elastic wedge.

Keywords: contact problem, Zhemochkin method, elastic quarter-plane, support node, hinged plate, flexibility index

For citation: Bosakov S. V., Skachok P. D. (2019) T Solution of Contact Problem for Supporting Node of Beam Hinged Plate. *Science and Technique*. 18 (4), 274–283. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-274-283> (in Russian)

Введение

При проектировании и строительстве зданий и сооружений весьма ответственные участки – это узлы сопряжения и опирания конструкций. Как известно, в случае взаимодействия конструкций с разными механическими характеристиками узлы являются концентраторами напряжений. Поэтому возникает задача в более детальном исследовании напряженно-деформированного состояния зоны контакта различных конструкций, т. е. решается так называемая контактная задача. Кроме того, контактную задачу можно рассматривать как расчет конструкций (балок, плит и др.) на упругом основании, исследуя разные его модели.

Большой вклад в развитие методов расчета конструкций на упругом основании внесли такие ученые, как Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицын, Т. А. Маликова, Г. К. Клейн, С. Н. Клепиков, Б. Г. Коренев, М. И. Горбунов-Посадов, В. И. Соломин, В. М. Александров и др. [1–9]. Наиболее простая – модель основания Винклера, или модель коэффициента постели [8], использовавшаяся, как правило, для расчета балок (ленточные фундаменты, шпалы рельсов и т. п.). Дальнейшее развитие фундаментостроения привело к появлению многих других моделей, а также их комбинаций. При этом рассматривалась как линейная, так и нелинейная их работа [4–9]. Каждая модель основания характеризуется конкретной функцией Грина. Поэтому при введении какой-либо модели основания главная задача состоит в определении для него функции Грина.

Особое место занимает решение контактных задач для упругого клина. Этим вопро-

сом занимались В. М. Александров, В. М. Пестерин, Д. А. Пожарский, К. В. Дмитриева и др. [1–3, 10–17]. В данной статье используется решение К. В. Дмитриевой, поскольку функция Грина для упругой четвертьплоскости выражается в элементарных функциях, достаточно легко интегрируется и дифференцируется [10, 11].

Постановка задачи и методика расчета

Исследуется напряженно-деформированное состояние узла шарнирного опирания балочной плиты на стену. Определяются реактивные давления в местах контакта плиты и стены, изгибающие моменты и поперечные силы в плите.

Принимается:

- для плиты считаются справедливыми гипотезы изгиба [18];
- в контактной зоне не учитываются касательные напряжения;
- стены, на которые опирается плита, принимаем в виде упругих четвертьплоскостей;
- связи между основанием и плитой считаются односторонними, работающими только на сжатие.

Поставленную задачу рассчитываем методом Б. Н. Жемочкина [5, 6]. Для этого область контакта упругого основания и плиты условно разбиваем на участки равной длины (участки Жемочкина). В середине каждого участка ставятся вертикальные жесткие связи, через которые осуществляется контакт плиты с упругой четвертьплоскостью. Считается, что усилие в связи вызывает равномерно распределенные контактные напряжения по ширине участка. В центре пролета балки вводится защемление.

Полученную статически неопределимую систему решаем смешанным методом строительной механики, где за основные неизвестные приняты усилия в связях Жемочкина и перемещения (угол поворота и вертикальное перемещение) во введенном в середине пролета плиты заземлении (рис. 1)

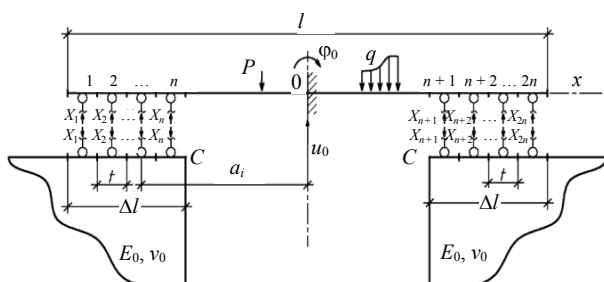


Рис. 1. Расчетная схема балочной плиты

Fig. 1. Design scheme of beam plate

Для нахождения основных неизвестных смешанного метода составляется система канонических уравнений, имеющая для рассматриваемой задачи особую структуру, отличающуюся от традиционной [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{1,1}x_1 + \delta_{1,2}x_2 + \dots + \delta_{1,n}x_n + u_0 + a_1\varphi_0 + \Delta_{1,P} = 0; \\ \dots \\ \delta_{n,1}x_1 + \delta_{n,2}x_2 + \dots + \delta_{n,n}x_n + u_0 + a_n\varphi_0 + \Delta_{n,P} = 0; \\ \delta_{n+1,n+1}x_{n+1} + \delta_{n+1,n+2}x_{n+2} + \dots + \delta_{n+1,2n}x_{2n} + u_0 + \\ + a_{n+1}\varphi_0 + \Delta_{n+1,P} = 0; \\ \dots \\ \delta_{2n,n+1}x_{n+1} + \delta_{2n,n+2}x_{n+2} + \dots + \delta_{2n,2n}x_{2n} + u_0 + \\ + a_{2n}\varphi_0 + \Delta_{2n,P} = 0; \\ -\sum_i^{2n} x_i + P = 0; \quad -\sum_i^{2n} a_i x_i + M = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\delta_{i,j}$ – коэффициенты при неизвестных в связях Жемочкина; u_0 , φ_0 – неизвестные перемещения в заземлении; n – число участков Жемочкина; P , M – опорные реакции заземления от действия внешней нагрузки (они же – равнодействующие внешних сил).

В матричном виде система (1) записывается следующим образом:

$$\mu A \vec{x} + \vec{\Delta}_P = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ & \delta_{i,j} & & 0 & 1 & a_i \\ & \ddots & \ddots & & & \\ & & \delta_{n+i,n+j} & & 1 & a_{n+i} \\ & & & \ddots & & \\ -1 & & -1 & & 0 & 0 \\ -a_i & & -a_{n+i} & & 0 & 0 \end{bmatrix} -$$

матрица коэффициентов при неизвестных; $\vec{x} = \{x_i, u_0, \varphi_0\}$ – вектор-столбец неизвестных; $\vec{\Delta}_P$ – вектор-столбец свободных членов; μ – коэффициент,

$$\mu = \frac{2(1 - \nu_0^2)}{\pi E_0}; \quad (3)$$

E_0 – модуль деформаций основания; ν_0 – коэффициент Пуассона основания.

Коэффициенты при неизвестных усилиях в связях Жемочкина определяются по формуле

$$\delta_{i,j} = \xi W_{i,j} + V_{i,j}, \quad (4)$$

где $W_{i,j}$ – вертикальное перемещение точки i плиты от действия вертикальной единичной силы, приложенной в точке j ; $V_{i,j}$ – перемещение точки i поверхности упругой четвертьплоскости от действия единичной силы, приложенной в точке j и распределенной по участку Жемочкина; ξ – показатель гибкости, зависящий от соотношения жесткостей плиты и основания [5].

Формула для определения перемещений балки следующая:

$$W_{i,j} = \frac{a_j^2}{l^2} \left(3 \frac{a_i}{l} - \frac{a_j}{l} \right), \quad \text{при } a_i \geq a_j; \quad (5)$$

$$W_{i,j} = \frac{a_i^2}{l^2} \left(3 \frac{a_j}{l} - \frac{a_i}{l} \right), \quad \text{при } a_i \leq a_j, \quad (6)$$

где a_i – координата точки i , в которой определяется перемещение; a_j – координата точки приложения единичной силы.

Показатель гибкости [5]

$$\xi = \frac{\pi E_0 b l^3}{12 E_b I_b} \frac{1 - \nu_b^2}{1 - \nu_0^2}, \quad (7)$$

где E_b , I_b , ν_b – модуль упругости, момент инерции, коэффициент Пуассона балочной плиты; $b = 1$ м – ширина выделяемой полосы из состава перекрытия.

Упругое основание рассматриваемой задачи представляет четвертьплоскость (рис. 2).

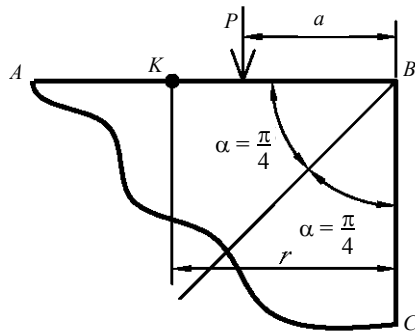


Рис. 2. Упругий клин

Fig. 2. Elastic wedge

Задача определения тангенциальных перемещений точек грани AB решена в работах К. В. Дмитриевой [10, 11]. Если принять $P = 1$, то на основании ее результатов имеем следующую формулу для определения относительного вертикального перемещения точки K поверхности четвертьплоскости:

$$V = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{a^{\frac{\pi}{2} A(\alpha)}}{a^{\frac{\pi}{2} A(\alpha)} - r^{\frac{\pi}{2} A(\alpha)}} \right)^2 + \frac{\pi}{8\alpha} \beta_1 \operatorname{sech} [C(\alpha, a, r)] + \quad (8)$$

$$+ \left(\frac{\pi}{8\alpha} \right)^3 \beta_3 \frac{\sin h^2 [C(\alpha, a, r)] - \cos h [C(\alpha, a, r)]}{\cos h^3 [C(\alpha, a, r)]} + \dots,$$

где
$$A(\alpha) = \frac{4\alpha + \sin 4\alpha}{4\alpha^2 - \sin^2 2\alpha}; \quad (9)$$

$$C(\alpha, a, r) = \frac{\pi}{16} \ln \left(\frac{\alpha}{r} \right)^2; \quad (10)$$

$$\beta_1 = -\frac{4}{3A(\alpha)} + \frac{16(4\alpha^5 - 2\alpha^3 \sin^2 2\alpha - \alpha^4 \sin 4\alpha)}{3(4\alpha^2 - \sin^2 2\alpha)^2}; \quad (11)$$

$$\beta_3 = \frac{16}{45A^3(\alpha)} - \frac{128\alpha^5(8\alpha^4 - 3\sin^4 2\alpha - \rightarrow}{45(4\alpha^2 - \sin^2 2\alpha)^3} \rightarrow \frac{-6\alpha^3 \sin 4\alpha - \alpha \sin^2(2\alpha) \sin(4\alpha)}{45(4\alpha^2 - \sin^2 2\alpha)^3} + 8\alpha^2 \beta_1. \quad (12)$$

Для определения перемещения точки приложения единичной силы распределяем силу на участке Жемочкина и вычисляем определенный интеграл от (8). Чтобы вычислить (8), предварительно раскладываем в ряд Тейлора выражение (8) в окрестности точки $r = a$ и берем первые три члена ряда [10]. При этом отметим, что данные перемещения определяются относительно вершины клина (точка B).

Далее решаем систему уравнений (2)

$$\bar{x} = -\frac{1}{\mu} A^{-1} \bar{\Delta}_p. \quad (13)$$

Положительные компоненты вектора $\bar{x}$ соответствуют усилиям сжатия в связях Жемочкина, а отрицательные – усилиям растяжения. При шарнирном опирании конструкции появление усилий растяжений в связях Жемочкина говорит об отрыве конструкции от основания, поэтому для определения контактной зоны необходимо поочередно удалять растянутые стержни, т. е. выключать их из работы с последующим пересчетом вектора (13) на каждом шаге. Таким образом, организуется итерационный процесс, признаком окончания которого являются положительные компоненты вектора $\bar{x}$.

Отметим, что найденная величина контактной зоны в значительной мере зависит от показателя гибкости ξ .

Решение поставленной задачи

Для численного исследования напряженно-деформированного узла опирания рассматривается железобетонная многпустотная плита марки П60-15 (Серия 1.141-1, вып. 2 «Панели перекрытий железобетонные многпустотные»), опирающаяся по концам на бетонную стену ($l = 5,98$ м – длина плиты; $E_b = E_0 = 29$ ГПа; $\nu_b = \nu_0 = 0,18$ – механические характеристики материалов железобетонной плиты и стены,

принятые согласно табл. 3.1 [19] для бетона класса С16/20).

Так как плита имеет ширину 1,49 м, а в плоской постановке рассматривается полоса шириной 1,00 м, для определения момента инерции поперечного сечения выделенной полосы считаем момент инерции поперечного сечения рассматриваемой многпустотной плиты с последующим пересчетом для полосы. При определении момента инерции поперечное сечение многпустотной плиты приводится к эквивалентному тавровому сечению (исключаются пустоты плиты), для которого и считается момент инерции, при этом учитывается рабочая арматура [20]. Момент инерции в пересчете для рассматриваемой полосы $I_b = 41547,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$. По приведенным геометрическим и механическим характеристикам системы «стена – балка» имеем для случая бетонной стены показатель гибкости $\xi = 134748$. Данная величина, согласно (7), безразмерная.

Глубина опирания Δl плиты перекрытия, опираемой по двум сторонам, согласно п. 6.4.2 [21] должна быть не менее 100 мм. В дальнейших расчетах принимаем $\Delta l = 0,100 \text{ м}$.

Количество участков Б. Н. Жемочкина в первом приближении для каждого узла $n = 5$. Длина участка Жемочкина

$$t = \frac{\Delta l}{n}. \quad (14)$$

Формируем матрицу коэффициентов (4) канонических уравнений при учете только первого слагаемого формулы (8).

Составляем вектор-столбец свободных членов. Принимаем нагрузку $P = 27000 \text{ Н/м}$, действующую на балку в виде сосредоточенной силы, приложенной в середине пролета балки, т. е. в начале координат. Поскольку в начале координат введено защемление, перемещения точек балки в местах установки связей Жемочкина от действия внешней нагрузки равны 0, а также момент в защемлении от действия внешней нагрузки равен 0.

Решаем систему линейных алгебраических уравнений и получаем вектор неизвестных. Согласно способу [6], усилия в связях Жемочкина есть равнодействующие реактивных давлений, равномерно распределенных в каждом участке Жемочкина, поэтому легко перейти к эпюре реактивных давлений – необходимо найденные усилия поделить на длину участка Жемочкина

на (рис. 3). Точка A соответствует краю плиты, точка B – вершина клина.

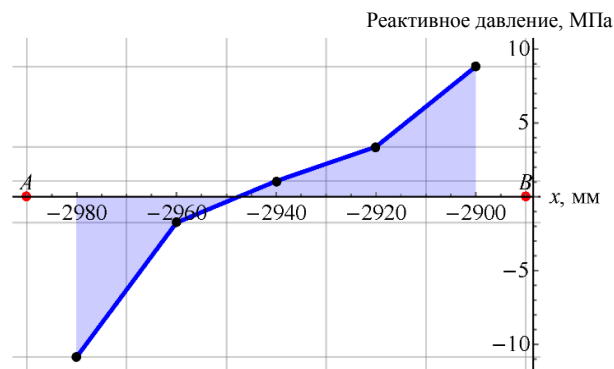


Рис. 3. Эпюра реактивных давлений в левом узле

Fig. 3. Plot of reactive pressures in left node

Поскольку нагрузка приложена в середине пролета плиты и глубина опирания плиты для левого и правого узлов одинаковая, то и эпюры реактивных давлений в левом и правом узлах одинаковые.

Согласно принятой схеме расчета (рис. 1), положительный знак усилия соответствует усилию сжатия в связи Жемочкина, а отрицательный – усилию растяжения. Усилие растяжения соответствует отрыву конструкции от основания, а следовательно, связи, в которых появляются растягивающие усилия, «выключаются» из работы. Поочередно удаляя «растянутые связи» и пересчитывая вектор неизвестных, в конечном итоге придем к реальной контактной зоне, признаком которой – положительные знаки при усилиях в оставшихся связях. В силу симметрии левого и правого узлов далее приводим эпюры реактивных давлений только для левого узла (рис. 4).

Как видно из рис. 4, осталась одна связь в рассматриваемом узле, ближайшая к краю стены. При $n = 20$ контактная зона также сводится к одной связи Жемочкина, т. е. к двум участкам Жемочкина.

Условимся в дальнейшем при исследовании контактной зоны принимать количество участков Жемочкина в одном узле опирания $n = 20$.

Как показали вычисления, основной вклад в определение коэффициентов δ_{ij} (4) принадлежит первому слагаемому формулы (8) и учет второго и третьего слагаемых несущественно влияет на конечный результат. В дальнейшем учитываем только первые два слагаемых уравнения (8).

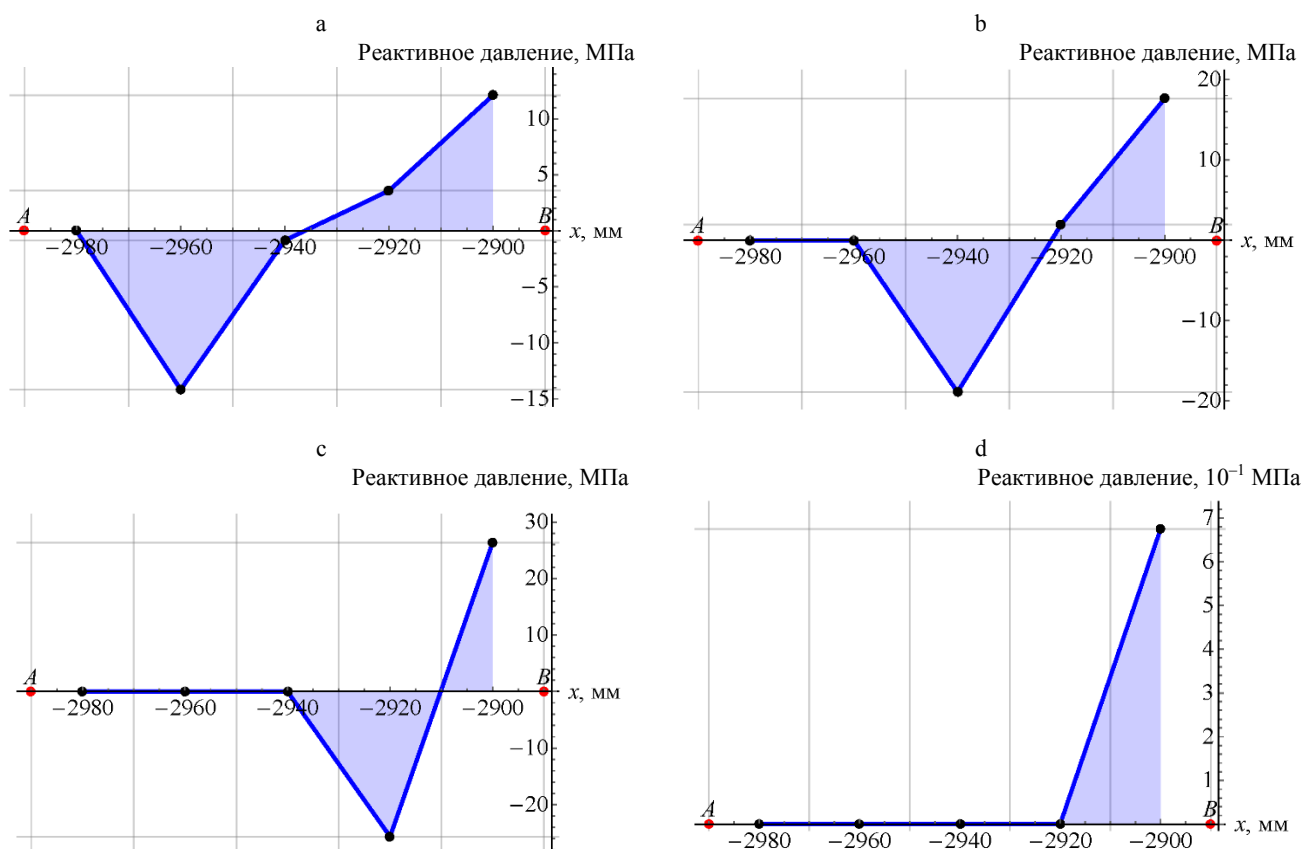


Рис. 4. Эпюры реактивных давлений после удаления: а – одной растянутой связи; б – двух связей; с – трех; д – четырех связей
Fig. 4. Plot of reactive pressures after removal of: a – one stretched bond; b – two bonds; c – three bonds; d – four bonds

Величина контактной зоны зависит от соотношения жесткостей опираемой конструкции и основания, т. е. от показателя гибкости ξ . Рассмотрим также опирание плиты на каменную кладку. Последовательность расчета останется прежней, изменятся только механические характеристики основания. Согласно разделу 7.6.2 [20],

модуль упругости каменной кладки в рассматриваемом случае $E_0 = E = 8,6$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu_0 = \nu = 0,18$. Таким образом, показатель гибкости при опирании плиты на каменную кладку $\xi = 44399,8$. Задача при таком показателе гибкости имеет похожее решение, как и в случае бетонной стены (рис. 5).

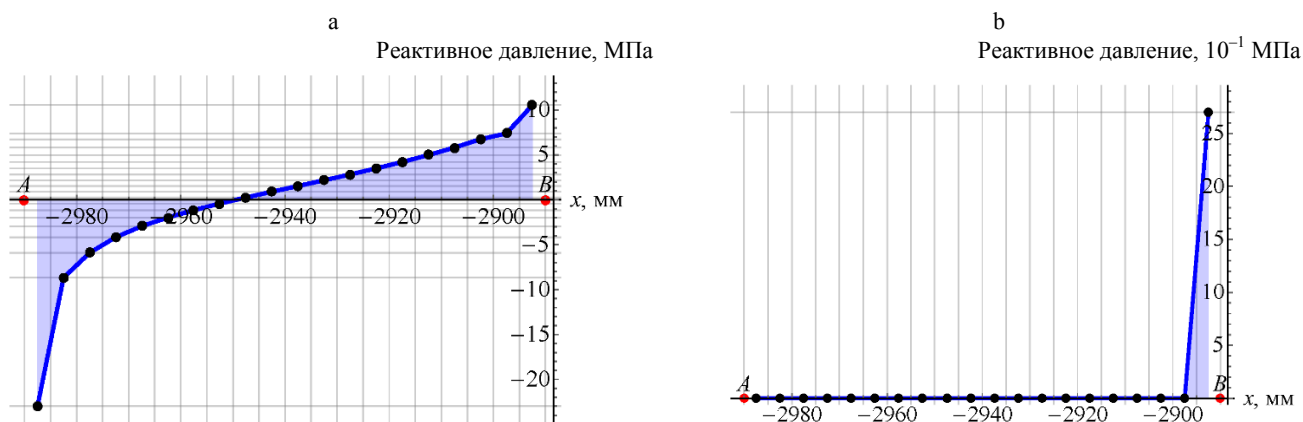


Рис. 5. Эпюры реактивных давлений: а – до удаления растянутых стержней; б – после удаления растянутых стержней
Fig. 5. Plot of reactive pressures: a – before removal of stretched rods; b – after removal of stretched rods

Величина контактной зоны находится в пределах одного участка Жемочкина.

Сравним векторы неизвестных для каменной кладки и бетонной стены (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение решения для стен из разных материалов при первой итерации

Comparison of solution for walls from various materials during first iteration procedure

Реактивное давление в участках Жемочкина, МПа	
Каменная кладка	Бетонная стена
-19,297	-22,980
-7,246	-8,667
-4,910	-5,905
-3,433	-4,167
-2,387	-2,942
-1,558	-1,974
-0,855	-1,153
-0,229	-0,421
0,350	0,256
0,898	0,904
1,432	1,538
1,960	2,174
2,493	2,824
3,039	3,500
3,606	4,214
4,204	4,982
4,842	5,818
5,531	6,747
5,974	7,396
8,285	10,557

Из табл. 1 видно, что для менее жесткого основания реактивные давления по абсолютной величине для участков Жемочкина меньше, чем для более жесткого основания. Однако равнодействующие в первом и во втором случаях будут равны $P/2$.

Особый интерес представляют данные, получаемые при различных показателях гибкости ξ . Рассмотрим для начала предельный случай $\xi = 0$, что соответствует опиранию абсолютно жесткой плиты. Эпюра распределения контактных напряжений не имеет принципиального значения – бетонная это стена или из каменной кладки. Считаем стену бетонной. Для данного случая получена эпюра, приведенная на рис. 6.

Чтобы удостовериться в правильности применяемой методики расчета, полученные результаты для случая опирания абсолютно жесткой плиты сопоставим с приближенным теоретическим решением В. М. Александрова [9].

В [9] рассмотрен случай действия на грань плоского клина жесткого штампа (рис. 7).

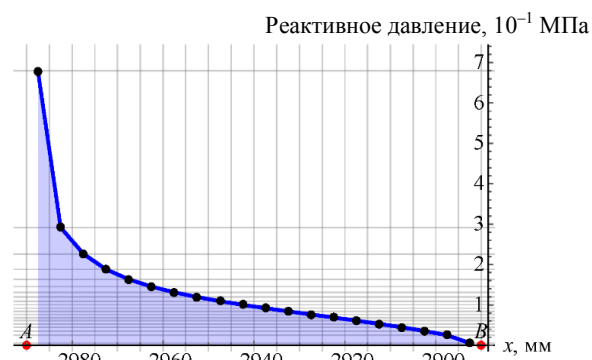


Рис. 6. Распределение напряжений в контактной зоне при опирании абсолютно жесткой плиты

Fig. 6. Distribution of stresses in contact zone while supporting absolutely rigid plate

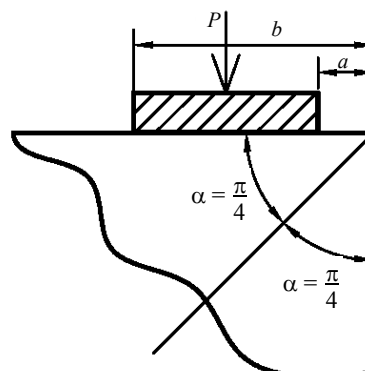


Рис. 7. Схема штампа

Fig. 7. Stamp scheme

Формула для определения эпюры контактных напряжений под штампом [9]

$$q(r) = \frac{B P r^{\pi B - 1}}{\sqrt{(r^{\pi B} - a^{\pi B})(r^{\pi B} - b^{\pi B})}}, \quad (15)$$

где r – координата точки, в которой определяется реактивное давление, относительно вершины клина; B – коэффициент, зависящий от угла створа клина α ; P – равнодействующая в узле.

Для рассматриваемой задачи: $\alpha = \frac{\pi}{4}$; $a = 0$;

$$b = \Delta l; \quad B(\alpha) = \frac{4\alpha + \sin 4\alpha}{2(4\alpha^2 - \sin^2 2\alpha)}. \quad \text{Совместная}$$

эпюра реактивных давлений под штампом показана на рис. 8.

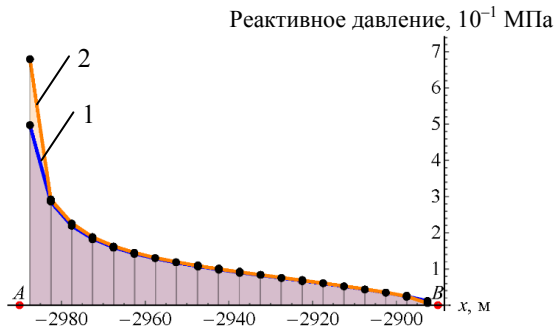


Рис. 8. Совместная эпюра реактивных давлений под штампом:

- 1 – решение В. М. Александрова;
2 – по рассчитываемой методике

Fig. 8. Joint plot of reactive pressures under stamp:
1 – Alexandrov solution;
2 – according to calculated methodology

Также сравнению подлежит определение расстояния до равнодействующей контактных напряжений H . По формуле (9) найдено $H = 0,073343$ м, а по предложенной методике $H = 0,0729351$ м. Погрешность составила

$$\frac{|0,0729351 - 0,073343|}{0,073343} \cdot 100 \% = 0,56 \%$$

Решения для контактных напряжений при различных значениях показателя гибкости ξ представлены на рис. 9.

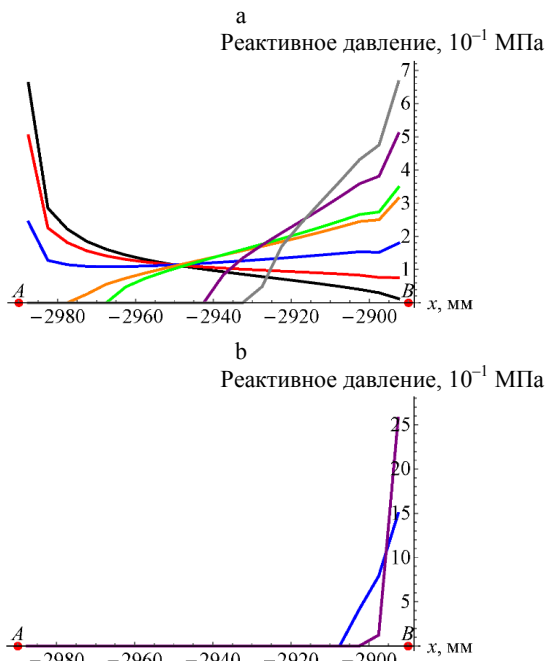


Рис. 9. Кривые распределения напряжений в контактной зоне при ξ : а – 10^{-3} ; б – 2500
Fig. 9. Stress distribution curves in contact zone with ξ : а – 10^{-3} ; б – 2500

По рис. 9 видно, что при увеличении показателя гибкости происходит уменьшение контактной зоны. При этом если принять, что на четвертьплоскость опирается железобетонная плита, то показатель гибкости (7) будет зависеть от модуля деформации основания.

Теперь выполним расчет контактной зоны с учетом местных деформаций плиты в узле опирания. Поскольку глубина площадки опирания Δl в два раза меньше высоты балки, часть балки в зоне опирания будем рассматривать как упругую четвертьплоскость (рис. 10).

Перемещения точек грани упругой четвертьплоскости плиты вычисляем по той же формуле (8), что и перемещения точек грани основания. В силу аналогичности расчетных моделей четвертьплоскостей плиты и основания наблюдается антисимметрия относительно центра матрицы единичных перемещений точек поверхностей четвертьплоскости основания и четвертьплоскости плиты. Например, единичное перемещение $V_{2,4}$ точки 2 основания от действия единичной силы $X_4 = 1$ равняется перемещению точки 4 балки от действия единичной силы $X_2 = 1$.

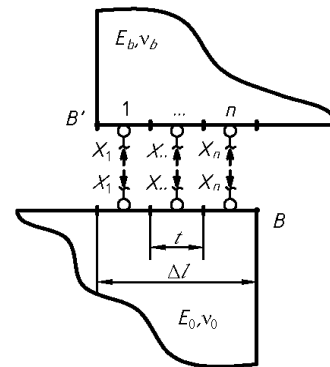


Рис. 10. Расчетная схема левого узла при учете местных деформаций: E_0, ν_0 – модуль деформации и коэффициент Пуассона основания;

E_b, ν_b – модуль упругости и коэффициент Пуассона плиты

Fig. 10. Design scheme of left node while taking into account local deformations: E_0, ν_0 – strain modulus and Poisson's ratio of base;

E_b, ν_b – elastic modulus and Poisson's ratio of plate

При расчете системы с учетом местных деформаций коэффициенты при неизвестных усилиях в связях Жемочкина определяются по следующей формуле:

$$\delta_{i,j} = \xi W_{i,j} + V_{i,j} + \psi V'_{i,j}, \quad (16)$$

где $V'_{i,j}$ – единичное перемещение точек грани четвертьплоскости плиты, определяется по (8); ψ – коэффициент, определяемый выражением

$$\psi = \frac{1 - \nu_b^2 E_0}{1 - \nu_0^2 E_b} \quad (17)$$

Как показали дальнейшие расчеты, контактная зона при учете местных деформаций плиты увеличивается (рис. 11).

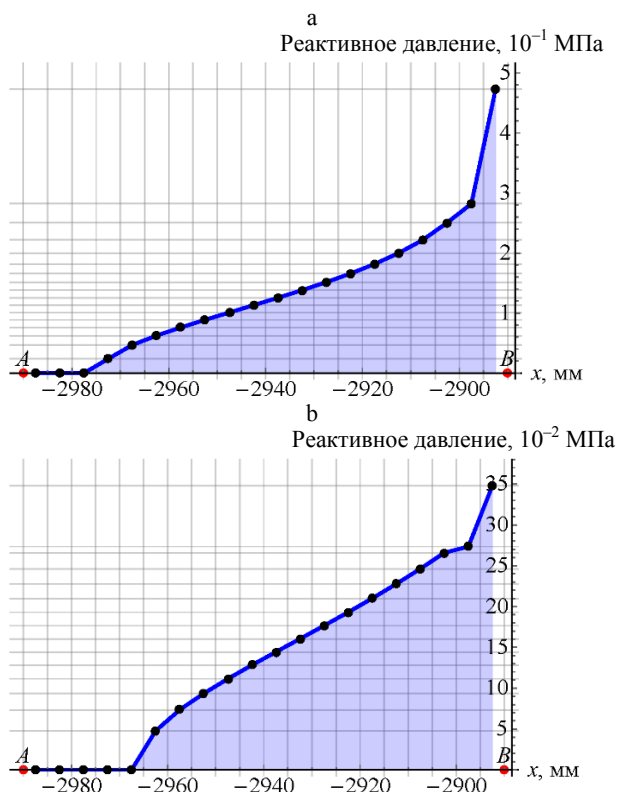


Рис. 11. Сравнение контактной зоны при учете местных деформаций плиты (а) и без их учета (б) при $\xi = 500$

Fig. 11. Comparison of contact zone while taking into account local deformations of plate (a) and without taking them into account (b) with $\xi = 500$

Особенность расчета на другие виды нагрузок заключается только в изменении вектора столбца свободных членов $\vec{\Delta}_p$. Весь алгоритм расчета остается прежним.

ВЫВОДЫ

1. Предложен итерационный алгоритм определения контактной зоны узла опирания балочной шарнирно опертой плиты при решении задачи методом Б. Н. Жемочкина.

2. В ТНПА расчетный пролет изгибаемых элементов принимается как сумма расстояния между внутренними поверхностями опор и половиной минимальной величины между рабочей высотой сечения и толщины опоры. Как показали вычисления, при опирании желе-

зобетонной балочной шарнирно опертой плиты на стену, выполненную как из бетона, так и из каменных материалов, расчетный пролет следует принимать как

$$l_{eff} = l_0 + \frac{5 \Delta l}{3 \cdot 20}, \quad (18)$$

где l_0 – расстояние между внутренними поверхностями стен; Δl – глубина опирания плиты.

3. При изменении показателя гибкости от $0 \leq \xi \leq 10000$ максимальный изгибающий момент меняется в пределах $\frac{1,025Pl}{4} \leq M \leq \frac{Pl}{4}$,

где l – расстояние между ближайшими к вершинам четвертьплоскостей связями Жемочкина.

4. Основное влияние на размеры зоны контакта оказывает соотношение жесткостей опираемой конструкции и основания. Принимая плиту абсолютно жесткой, наибольшее реактивное давление возникает у края опираемой конструкции, что подтверждается теоретическим решением В. М. Александрова.

5. Учет местных деформаций в плите увеличивает контактную зону опирания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, В. М. Контактные задачи в машиностроении / В. М. Александров, Б. Л. Ромалис. М.: Машиностроение, 1986. 176 с.
2. Александров, В. М. Неклассические пространственные задачи механики контактных взаимодействий упругих тел / В. М. Александров, Д. А. Пожарский. М.: Факториал, 1998. 288 с.
3. Александров, В. М. Плоские контактные задачи для составного упругого клина / В. М. Александров, Д. А. Пожарский // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение. 2006. № 6. С. 27–30.
4. Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. Минск: БНТУ, 2002. 128 с.
5. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 680 с.
6. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчетов фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицын. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1962. 240 с.
7. Клепиков, С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. Киев: Будівельник, 1967. 184 с.
8. Коренев, Б. Г. Вопросы расчета балок и плит на упругом основании / Б. Г. Коренев. М.: Госстройиздат, 1954. 231 с.
9. Развитие теории контактных задач в СССР / Академия наук СССР, Ин-т проблем механики; отв. ред. Л. А. Галин. М.: Наука, 1976. 496 с.
10. Дмитриева, К. В. Контактная задача для штампа на упругом клине со свободными гранями / К. В. Дмитриева // Вестник БНТУ. 2010. № 4. С. 24–29.

11. Дмитриева, К. В. Расчет нелинейно-упругой гибкой стенки в упругом основании / К. В. Дмитриева. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2017. 26 с.
12. Кулагина, М. Ф. Решение первой основной задачи теории упругости для клина в степенных рядах / М. Ф. Кулагина, Э. Г. Иванов // Известия Тульского государственного университета. 2009. Вып. 2. С. 127–138.
13. Митрофанов, Б. П. Действие нормальной сосредоточенной силы на упругий прямоугольный бесконечный клин / Б. П. Митрофанов // Известия Томского политехнического института. 1964. Т. 114. С. 112–114.
14. Молчанов, А. А. Обобщения контактной задачи Галина и взаимодействие штампов / А. А. Молчанов, Д. А. Пожарский // Вестник Нижегородского университета имени Лобачевского. 2011. № 4–4. С. 1636–1638.
15. Пестренин, В. М. Нестандартные задачи для однородных элементов конструкций с особенностями в виде клиньев в условиях плоской задачи / В. М. Пестренин, И. В. Пестренина, Л. В. Ландик // Вестник Томского государственного университета. 2014. Т. 27, № 1. С. 95–109.
16. Пожарский, Д. А. К расчету напряжений в трехмерном упругом клине / Д. А. Пожарский, Н. А. Ларцева // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение. 2007. № 2. С. 31–32.
17. Рекомендации по расчету осадок и кренов прямоугольных фундаментов на клиновидном основании / НИИОСП Госстрой СССР. М., 1985. 29 с.
18. Александров, А. В. Сопротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин; под ред. А. В. Александрова. 2-е изд. испр. М.: Высш. шк., 2000. 560 с.
19. Еврокод 2. Проектирование ЖБК. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1–2009*. Введ. 10.12.2009. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 191 с.
20. Расчет и конструирование сборных железобетонных конструкций многоэтажного каркасного здания / Н. А. Рак [и др.]. Минск: БНТУ, 2012. 96 с.
21. Возведение строительных конструкций, зданий и сооружений. Основные требования: ТКП 45-1.03-314–2018. Введ. 06.02.2018. Минск: Минстройархитектуры, 2018. 124 с.
22. Поступила 14.03.2019
Подписана в печать 28.05.2019
Опубликована онлайн 31.07.2019
23. REFERENCES
1. Alexandrov V. M., Romalis B. L. (1986) *Contact Problems in Mechanical Engineering*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 176 (in Russian).
2. Alexandrov V. M., Pozharsky D. A. (1998) *Nonclassical Spatial Mechanics Problems for Contact Interaction of Elastic Solids*. Moscow, Faktorial Publ. 288 (in Russian).
3. Alexandrov V. M., Pozharsky D. A. (2006) Plane Contact Problem for Split Flexible Wedge. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye Nauki University = News North-Caucasian Region Natural Sciences Series*, (6), 27–30 (in Russian).
4. Bosakov S. V. (2002) *Statistical Calculations of Plates on Elastic Foundation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 128 (in Russian).
5. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on Elastic Foundation*. 3rd ed. Moscow, Stroyizdat Publ. 680 (in Russian).
6. Zhemochkin B. N., Sinitsyn A. P. (1962) *Practical Methods for Calculations of Foundation Beams and Plates on Elastic Foundation*. 2nd ed. Moscow, Gosstroyizdat Publ. 240 (in Russian).
7. Klepikov S. N. (1967) *Calculation of Structures on Elastic Foundation*. Kiev, Budivelnik Publ. 184 (in Russian).
8. Korenev B. G. (1954) *Calculation Problems for Beams and Plates on Elastic Foundation*. Moscow, Gosstroyizdat Publ. 231 (in Russian).
9. Galin L. A. ed. (1976) *Development of Theory for Contact Problem in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. 496 (in Russian).
10. Dmitrieva K. V. (2010) Contact Problem for Punch on Flexible Wedge with Free Edges. *Vestnik BNTU*, (4), 24–29 (in Russian).
11. Dmitrieva K. V. (2017) *Calculation of Non-Linear-Elastic Flexible Wall in Elastic Foundation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 26 (in Russian).
12. Kulagina M. F., Ivanov E. G. (2009) Solution of First Main Problem of Elasticity Theory for Wedge in Power-Law Series. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta = Izvestiya Tula State University*, (2), 127–138 (in Russian).
13. Mitrofanov B. P. (1964) Action of Normal Concentrated Force on Elastic Rectangular Wedge of Infinite Extent. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Instituta [Proceedings of Tomsk Polytechnical Institute]*, 114, 112–114 (in Russian).
14. Molchanov A. A., Pozharsky D. A. (2011) Generalization of the Galin Contact Problem and Punch Inter-Action. *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, (4–4), 1636–1638 (in Russian).
15. Pestrenin V. M., Pestrenina I. V., Landik L. V. (2014) Non-Standard Problems for Uniform Elements of Structures with Specific Features in the Form of Wedges under Conditions of Plane Problem. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Tomsk State University Journal*, 27 (1), 95–109 (in Russian).
16. Pozharsky D. A., Lartseva N. A. (2007) On Stress Calculation in 3D-Flexible Wedge. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye Nauki University = News North-Caucasian Region Natural Sciences Series*, (2), 31–32 (in Russian).
17. Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) of USSR State Committee for Construction (1985) *Recommendations on Calculation of Settlement and Displacement of Rectangular Foundation on Wedge-Type Base*. Moscow. 29 (in Russian).
18. Alexandrov A. V., Potapov V. D., Derzhavin B. P. (2000) *Resistance of Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 560 (in Russian).
19. ТКП [Technical Code of Common Practice] EN 1992-1-1–2009*. *Eurocode 2. Designing of Reinforced Concrete Structures. Part 1-1. General Rules and Rules for Assignments*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 191 (in Russian).
20. Rak N. A., Danilenko I. V., Smekh V. I., Shcherbak S. B. (2012) *Calculation and Designing of Assembled Reinforced Structures for Multi-Storey Half-Timbered Building*. Minsk, Belarusian National Technical University. 96 (in Russian).
21. ТКП [Technical Code of Common Practice] 45-1.03-314–2018. *Installation of Building Structures, Buildings and Facilities. Basic Requirements*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2018. 124 (in Russian).

Received: 14.03.2019

Accepted: 28.05.2019

Published online: 31.07.2019

Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction

S. N. Leonovich¹⁾, E. E. Shalyi²⁾, L. V. Kim²⁾

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

²⁾Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Abstract. Reinforcement corrosion of marine and coastal hydraulic structures due to chloride aggression and concrete carbonization leads to a sharp decrease in structure safety. The reinforcement is subjected to a depassivation process as soon as a chloride concentration on its surface exceeds a certain threshold concentration, or the pH value in a concrete protective layer is decreased to a threshold value due to carbonation. Electrochemical reactions are realized with formation of corrosion products due to penetration of oxygen up to reinforcement surface. This leads to cracking of the concrete protective layer and decrease in reinforcement cross-section. The paper proposes a method for predicting a complex degradation of reinforced concrete structures with due account of various mechanisms of corrosion wear that allows to develop efficient methods for improvement of structure durability and maintainability which are operated in the marine environment. A methodology for forecasting of reinforced concrete service life prediction has been developed under a combined effect of carbonization and chloride aggression while using finite-difference and probability models. The paper takes into account initiation periods of reinforcement corrosion and propagation periods for conditions of Sakhalin shelf zone. Field surveys of Kholmsk and Korsakov port facilities are presented in the paper. Carbonization front and chloride content have been estimated according to depth of the concrete protective layer. The paper proposes a model that allows to determine an average period prior to repair while taking into account rate of concrete protective layer degradation caused by simultaneous action of two corrosion processes: carbonization and chloride aggression.

Keywords: reinforced concrete, carbonization, chloride aggression, service life prediction, probabilistic model

For citation: Leonovich S. N., Shalyi E. E., Kim L. V. (2019) Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction. *Science and Technique*. 18 (4), 284–291. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-284-291>

Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾, асп. Е. Е. Шалый²⁾, канд. техн. наук, проф. Л. В. Ким²⁾

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

²⁾Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

Реферат. Коррозия арматуры морских и прибрежных гидротехнических сооружений вследствие хлоридной агрессии и карбонизации бетона ведет к резкому снижению безопасности сооружения. Арматура подвергается процессу депассивации как только концентрация хлорида на ее поверхности превысит пороговую либо значение pH в защитном слое бетона уменьшится до порогового значения в результате карбонизации. При проникновении кислорода до поверхности арматуры реализуются электрохимические реакции с образованием продуктов коррозии. Это приводит к растрескиванию защитного слоя бетона, уменьшению площади сечения арматуры. В статье предложен метод прогнози-

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

рования комплексной деградации железобетонных конструкций прибрежных сооружений с учетом различных механизмов коррозионного износа, что позволяет разработать эффективные способы повышения долговечности и ремонтпригодности конструкций, эксплуатируемых в морской среде. Разработана методика прогнозирования долговечности железобетонных конструкций при совместном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии с использованием конечно-разностной и вероятностной моделей. Учтены периоды инициирования и распространения коррозии арматуры для условий шельфовой зоны острова Сахалин. Выполнены полевые исследования сооружений портов Холмск и Корсаков. Произведена оценка фронта карбонизации и содержания хлоридов по глубине защитного слоя бетона. Предложена модель, позволяющая определить средний период до ремонта с учетом скорости деградации защитного слоя бетона от одновременного воздействия двух коррозионных процессов: карбонизации и хлоридной агрессии.

Ключевые слова: армированный бетон, карбонизация, хлоридная агрессия, прогнозирование срока службы, вероятностная модель

Для цитирования: Леонович, С. Н. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы / С. Н. Леонович, Е. Е. Шалый, Л. В. Ким // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 284–291. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-284-291>

State of the Issue and Research Objectives

Existing models do not allow to take into due consideration possible changes in operating conditions, a combination of several factors of an aggressive environment. Complex modeling of various factors makes it possible to take into account the stochastic nature of the processes of carbonization and chloride aggression, changes in operating conditions of structures or requirements imposed on them.

The purpose of the study: to develop a methodology for calculating of reinforced concrete structures durability for the climatic conditions of the coastal Far East seas zone from the complex effects of carbonization and chloride aggression.

Objectives of the study: analyze the results of studies on the complex effects of carbonization and chloride aggression on marine concrete; to improve the theoretical models of carbonization and chloride aggression, taking into account the crack formation and propagation in the protective layer of concrete; to develop a probabilistic method for predicting the service life of reinforced concrete port structures, taking into account the complex effects of carbonization and chloride aggression; experimentally investigate the technical condition of the reinforced concrete elements of the port facilities in exploitation, and identify the specific features of their degradation in the marine environment, including taking into account technological factors.

Verification of a deterministic model for calculating the combined effect of carbonization and chloride aggression

The deterministic model for calculating the combined effect of carbonization and chloride ag-

gression on marine concrete based on the 2nd Fick Law was verified.

A model for solving the differential diffusion equation, J. Crank has been adopted, taking into account the effect of carbonization on the transport of chlorine ions in concrete. The basic equation has the Cl form:

$$\frac{\partial C_{Cl}}{\partial t} = \frac{D_{Cl}^*}{1 + \left(\frac{1}{w_e} \right) \cdot \left[\frac{\alpha_L (1 - da_c)}{\left(1 + \beta_L \frac{C_f}{b} \right)^2} \right]} \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2}, \quad (1)$$

where α_L , β_L – empirical constants; a_c – empirical constants; d – coefficient of decrease in the connecting ability of chloride due to carbonization; C_{Cl} – general content of chloride in concrete; C_f – content of free chloride in concrete; t – operation time; b – mass of knitting; x – depth of a protective layer.

Extent of carbonization of concrete is defined from a proportion:

$$\%X_c - 100 \% a_c;$$

$$\%KC - x \% a_c,$$

where X_c – extreme size of carbonization; KC – carbonate component

$$KC = \frac{m_{CaCO_3}}{m_H} \cdot 100 \%;$$

m_{CaCO_3} – mass of a carbonate component; m_H – the mass of a hinge plate of test, is defined experimentally.

Extreme size of carbonization is determined by a formula

$$X_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}}{a_c} \int_1^t f_T(t) f_W(t) C_{CO_2}(t) dt \left(\frac{t_0}{t}\right)^{0,12}}, \quad (3)$$

where $f_T(t)$, $f_W(t)$, $C_{CO_2}(t)$ – funktion of influence of temperature, humidity and concentration CO_2 on diffusion coefficient; a_c – the coefficient defining quantity CO_2 , necessary for transformation of all capable to be carbonated hydration products; D_{CO_2} – initial coefficient of diffusion of carbon dioxide in concrete.

For taking note CO_2 assessment of content of carbon dioxide in air taking into account service life of reinforced concrete structures is executed, according to data of Keeling a curve. As concentration of chlorides in the marine environment changes depending on weather conditions, the model of sea water impact on constructions is modified by input of dependence on distance between a construction and the coast [1–4].

For verification of model of joint action of carbonization and chloride aggression reinforced concrete structures of the classes XC4 and XS3 under the terms of operation with average values of parameters of concrete mix according to EN 206:2013 and the minimum thickness of concrete protective layer on the joint venture 28.13330.2012 are taken. According to the offered technique, calculations for these tab. 1 are carried out.

Table 1
Basic data of final and differential model

Parameter, unit-ism.	Site of Sakhalin Island		
	Northern	Central	Southern
$T_{max}, ^\circ C$	18,3	20,5	17,7
$T_{min}, ^\circ C$	-7,3	-6,2	-2,4
$W_{max}, \%$	86	81	85
$W_{min}, \%$	74	76	71
w/b	0,4	0,4	0,4
$b, kg/m^3$	350	350	350
Carbonization			
g_e	2,5	2,5	2,5
f_e	5	5	5
$E, kJ/mol$	40	40	40
$R, kJ/K$	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$
$C_s, kg/m^3$	$3,890 \cdot 10^{-4}$	$3,890 \cdot 10^{-4}$	$3,890 \cdot 10^{-4}$
$D_{CO_2}, sm^2/s$	$3,399 \cdot 10^{-4}$	$3,399 \cdot 10^{-4}$	$3,399 \cdot 10^{-4}$
n_m	0,12	0,12	0,12
Chloride aggression			
$E, kJ/mol$	41,8	41,8	41,8
$R, kJ/K$	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$
α_L	0,1185	0,1185	0,1185
β_L	0,09	0,09	0,09
$W_{ref}, \%$	65	65	65
$C_{env}(L), kg/m^3$	6,2	6,2	6,2
m	0,4	0,4	0,4
$t_0, days (years)$	28 (0,0767)	28 (0,0767)	28 (0,0767)
$t, year$	50	50	50

For modeling the program in Mathcad (authors D. Shestovitsky and E. Karapetov) executed on the basis of final and differential approach is used and modified (fig. 1, tab. 2).

Results of modeling

Parameter, unit-ism.	Place of operation		
	Northern	Central	Southern
Front of carbonization ($t = 50$ of years), mm	30,80	29,60	29,40
Extent of carbonization	0,61	0,60	0,60
Concentration of chlorides on fittings depth without carbonization (at $t = 50$ of years), %	0,55	0,65	0,44
Too taking into account carbonization (at $t = 50$ of years), %	0,65	0,60	0,54
Time of initiation of chloride corrosion without carbonization, year	50	40	43
Too taking into account carbonization, year	45	35	30

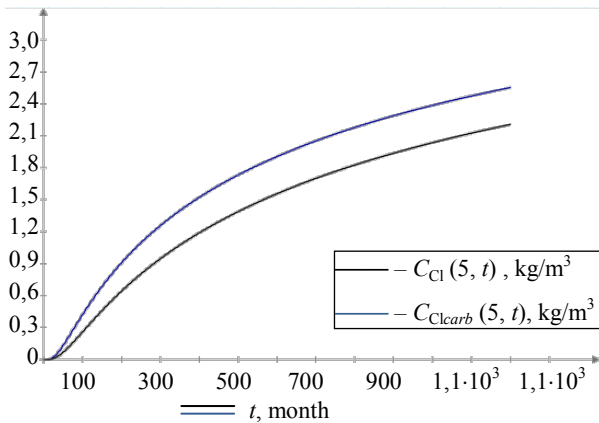


Fig. 1. Change of concentration of chlorides in protective concrete layer taking into account and without carbonization (the southern site):
 $C_{Cl}(x, t)$ – concentration of chloride ions in protective layer without carbonization;
 $C_{Clcarb}(x, t)$ – concentration of chloride ions in protective layer with carbonization.
 Critical concentration of chlorides – 0,4 % or 1,4 kg/m³

Results have shown, that carbonization has led to release of chloride ions in pore's solution, in the investigation of what, service life of structures decreases.

Technique of probabilistic calculation of joint action of carbonization and chloride aggression

The technique of probabilistic calculation of joint impact of carbonization and chloride aggression on concrete is developed. The equation of probability of refusal is the cornerstone:

$$P_f = P(R - S \leq 0) \leq P, \quad (4)$$

where P_f – rejection probability; P – admissible probability of approach of a limit state; S – loading function; R – function of resistance of a structures.

For chloride corrosion, in probabilistic statement, represents value of concentration of chlorides $C_{Cl}(x, t)$. C_{crit} – parameter of critical (threshold) concentration of chloride at the level of bedding of fittings, which excess leads to corrosion initiation. In this case probability of no-failure operation:

$$P_f = P(\{C_{crit} - C(x, t)\} \leq 0) \leq P. \quad (5)$$

$C_{Cl}(x, t)$ decides on use of model, which is based on the decision of the 2nd law of diffusion of A. Fick by means of function of a mistake of C. Andrade:

$$C_1(x, t) = C_0 \sum_{n=0}^{\infty} a^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2ne + x}{2\sqrt{D_1(t) \cdot t}} \right) - \right.$$

$$\left. - a \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+2)e - x}{2\sqrt{D_1(t) \cdot t}} \right) \right]; \quad (6)$$

$$C_2(x, t) = \frac{2kC_0}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{(2n+1)e + kx}{2\sqrt{D_1(t)}} \right) \right]; \quad (7)$$

$$a = \frac{1-k}{1+k}; \quad (8)$$

$$k = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}, \quad (9)$$

where $D_1 = D_{Cl,cb}$ – coefficient of diffusion of chlorides of carbonized concrete; $D_2 = D_{Cl,ucb}$ – coefficient of diffusion of chlorides of not carbonized concrete.

The model is based on difference of coefficients of diffusion in one cut (“skin-effect”), that results or repair restoration of a protective layer of concrete, or at action of a set of aggressive factors of the external environment on a structure. In a case of joint action of carbonization and chloride aggression, formulas (6) and (7) will be transformed to a type:

$$C_{Cl,cb}(x, t) = C_S \sum_{n=0}^{\infty} a^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2nX_c + x}{2\sqrt{D_{Cl,cb}(t) \cdot t}} \right) - \right. \quad (10)$$

$$\left. - a \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+2)X_c - x}{2\sqrt{D_{Cl,cb}(t) \cdot t}} \right) \right];$$

$$C_{Cl,ucb}(x, t) = \frac{2kC_S}{k+1} \times \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{(2n+1)x + k(x - X_c)}{2\sqrt{D_{Cl,cb} \cdot t}} \right) \right], \quad (11)$$

where C_S – superficial concentration of chlorides, %; x – thickness of a protective layer of concrete, mm; (x) – inverse function of mistakes of Gauss; $X_c = X_c(t)$ – depth of carbonization of concrete, mm; t – time, years; k – coefficients from formulas (8) and (9).

In a research resistance between layers, which results from a difference of coefficients of diffusion in one cut is also considered

$$C_{Cl,ucb}(x, t) = \frac{2kC_S R}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \times \left[\left(\frac{(2n+1)x + k(x - X_c)}{2\sqrt{D_{Cl,cb} \cdot t}} \right) \right], \quad (12)$$

where R – resistance between layers.

$C(x, t)$ calculates taking into account action of carbonization how system from formulas (10) and (12).

A row of basis variables enters estimated model of combined action of carbonization and chloride aggression. Recommendations about mean values of these variables and their types of distribution are offered. For the southern part of Sakhalin Island in tab. 3 their mean values, a standard deviation and type of distribution are this.

Table 3

The concentration of chlorides for probable simulation

Parameter, unit-ism.	Southern part of Sakhalin Island		
	Distribution type	Average value	Standard deviation
$C_s, \%$	Const	2,5	—
x, mm	Const	Vector from a set $\{0-50\}$	—
$D_{ck,cb}^0, \text{m}^2/\text{s}$	Normal	$11,689 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$
$D_{cl,ucb}^0$	Normal	$2,387 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$
k_e	Normal	0,67	0,05
K	Normal	—	—
K	Const	273	—
k_t	Normal	0,80	0,05
k_c	Normal	1	0,125
t_0, year	Const	0,0767	—
t, year	Const	Vector from a set $\{t_0-50\}$	—
ncl	Beta	0,3	$a = 0; b = 1$
$C_{crit}, \%$	Normal	0,4	0,063

For the analytical solution of a direct problem of determination of probability of resource refusal and the return problem of definition of a percentage resource of structures imitating modeling with calculation of necessary functionalities, for example, of the content of chlorides at the set depth, service life, etc. is used.

For computer realization in the Matlab program the calculation code for model of penetration of chlorides taking into account effect of carbonization is written. Result of calculation of the program – probabilities of resource refusal of a structure and indexes of reliability during service life for various values of thickness of a concrete protective layer. At the first stage the program determines depths of carbonization and change of concentration of chlorides by depth (fig. 2–4).

The Probability refusal of construction and index of reliability are presented in fig. 5, 6 and tab. 4.

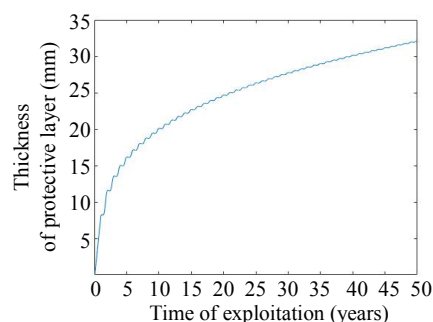


Fig. 2. Growth of depth of carbonization eventually

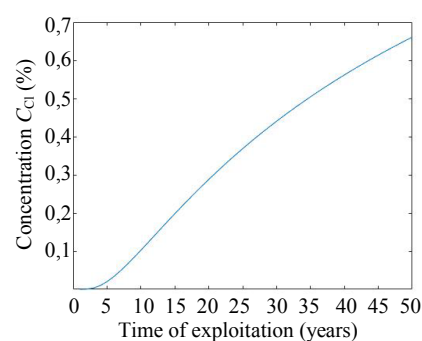


Fig. 3. Change of concentration of chlorides in a zone near reinforcement for all term of an exploitation

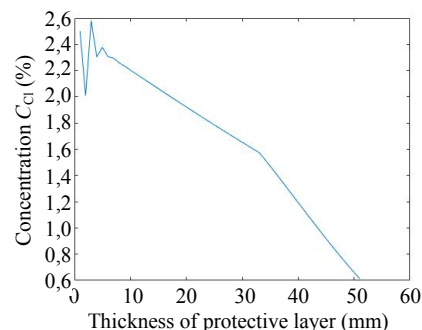


Fig. 4. Profile of concentration of chlorides in zone near reinforcement in the last year of exploitation (50 years)

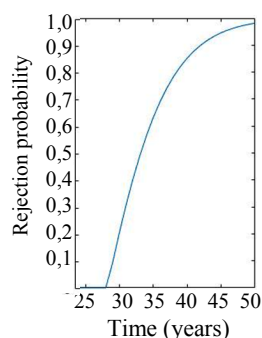


Fig. 5. Probability refusal of construction

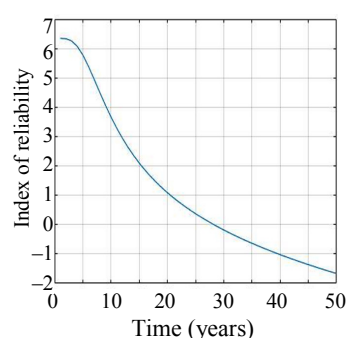


Fig. 6. Index of reliability of a construction

Table 4
Probability of refusal and the index of reliability of reinforced concrete constructions, depending on exploitation term for the southern site of Sakhalin Island

Operation term	Probability of refusal p_f	Index of reliability β
10	0,0001	3,688
20	0,005	1,102
30	0,190	-0,173
40	0,849	-1,020
50	0,981	-1,660

Results of natural researches

The executed natural researches: visual survey, determination of critical elements and areas, determination of strength and thickness of a concrete protective layer, the choice of test zones by results of measurements.

In test zones are carried out: visual survey for the choice of places of testing and sampling, check of concrete protective layer depth, the choice of places of sampling in "the worst places" of construction, determination of carbonization depth by phenol-phtalein test (6 and more places); selection of plates for chloride profiles (at least six plates in each test zone of the minimum size of 70×70 mm and minimum depth of 50 mm).

The laboratory is defined: by means of an ion-selective electrode value of concentration of chlo-

rides on depth of samples, phenol-phtalein test – carbonization depth.

Results of modeling of joint action of carbonization and chloride aggression and their comparison with experimental data (tab. 5).

The good convergence with probabilistic model and satisfactory with final and differential is received (the last doesn't consider "skin-effect"). The diffusion coefficient in final and differential model is constant at all depth of a protective layer, i. e. there is no breakdown on 2 layers with different diffusion and there is no resistance between these layers therefore concentration of chlorides in a zone near reinforcement it is overestimated. However, this model can be applicable for calculation of joint action of carbonization and chloride aggression with a small depth of carbonization when "skin-effect" doesn't exert considerable impact on concentration of chlorides in a zone near reinforcement.

Thus, with an insignificant depth of carbonization (up to 8 mm) calculation can be conducted on final and differential model, at considerable – values are overestimated and calculation should be conducted on probabilistic model. In practice with a depth of carbonization up to 8 mm the effect of joint action of carbonization and chloride aggression isn't considered, and the DuraCrete model is used. Thus, the most exact model – probabilistic.

Table 5

Comparison of computational and experimental results

Type	The place of selection of test	Age of a coonstruction	Depth of a protective layer, mm	The measured concentration of Cl, %	The measured concentration of Cl, %	Concentration of Cl, % on probabilistic model
Holmsk sea trade port						
X4	Reinforced concrete column of the bridge	33	10	2,24	2,80	2,20
			20	1,97	2,20	1,90
			30	1,64	1,81	1,62
			40	1,10	1,20	1,03
			50	0,51	0,58	0,49
X5	Reinforced concrete beam of the bridge	33	10	2,25	2,28	2,21
			20	1,98	2,21	1,94
			30	1,68	1,82	1,62
			40	1,10	1,20	1,03
			50	0,50	0,58	0,49
Korsakov sea trade port						
K4	The base under the sign SNO	44	10	2,32	2,76	2,13
			20	1,81	2,19	1,77
			30	1,46	1,77	1,44
			40	1,10	1,17	1,07
			50	0,55	0,63	0,53
K5	Reinforced concrete foundation under pipes.	46	10	2,32	2,79	2,15
			20	1,81	1,22	1,80
			30	1,48	1,81	1,50
			40	1,10	1,23	1,10
			50	0,55	0,65	0,55

Probabilistic model for determination of parameters for repair of a concrete protective layer

It is supposed that the irreversible consequences leading to chloride corrosion of fittings in carbonized concrete can begin already at concentration of ions of chloride of 0,2 %. Using this value as critical at which it is necessary to make repairs of a concrete protective layer, and also using model for the double environment formulas (10) and (12), the program of calculation of average time and depth of repair of the damaged protective layer which also allows to predict construction ser-

vice life, but already taking into account repair is developed (tab. 6, fig. 7). As material for repair the solution similar to initial composition of concrete is chosen. Probability of refusal and the index of reliability are represented in tab. 7 and fig. 8, 9.

After 50 years of operation in the most adverse region of Sakhalin Island under the terms of operation, the probability of refusal was $p_f = 58\%$. Thus, repair of a construction by the method of replacement of a carbonized layer new with similar characteristics increases strength. For example, in a construction, in which corrosion after 29 years of operation was initiated the modern times of initiation are 45 years.

Table 6

Service life of a reinforced concrete construction, taking into account repair of a concrete protective layer

Parameter, measuring	Place of operation, Southern part Sakhalin Island
Time of initiation of chloride corrosion without replacement of a carbonized layer, year	29
Design service life without replacement of a carbonized layer, year	33
Average time of replacement of a carbonized layer, year	16
Average depth of replacement of a carbonized layer, mm	24.5
Time of chloride corrosion initiation, taking into account replacement of a carbonized layer, year	45
Design service life, taking into account replacement of a carbonized layer, year	49

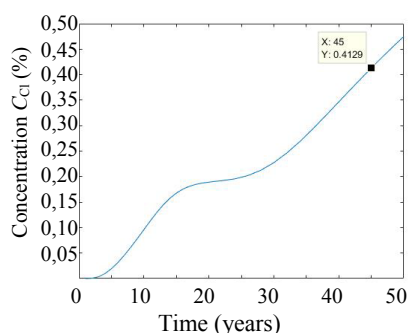


Fig. 7. Change of Concentration of Chlorides in zone near reinforcement for all term of an exploitation taking into account repair

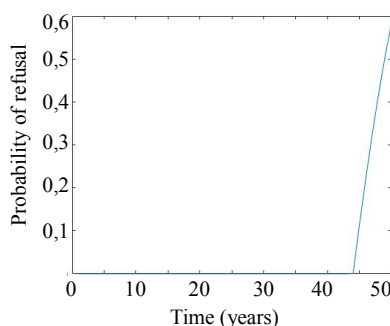


Fig. 8. Probability of refusal of the repaired construction

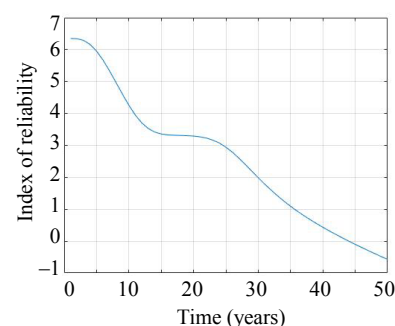


Fig. 9. The index of reliability of the repaired construction

Table 7

Probability of refusal and the index of reliability of the repaired reinforced concrete construction, depending on operation term for the most adverse region of Sakhalin Island under the terms of exploitation

Operation term	Probability of refusal p_f	Index of reliability β
10	0,0001	4,27
20	0,0008	3,29
30	0,0120	2,00
40	0,1090	0,44
50	0,5820	-0,57

CONCLUSIONS

1. On the basis of the analysis of models of joint action of carbonization and chloride aggression of a concrete protective layer and verification with experimental data the model for assessment of durability of sea reinforced concrete constructions considering the following factors is defined: thickness of a concrete protective layer; coefficients of diffusion of chlorides in carbonized and not carbonized concrete; critical content and superficial content of chlorides, superficial amount of CO_2 ,

their time of influence; sea conditions; front of carbonization, etc.

2. The technique of determination of repair term of a constructions and depth of concrete protective layer repair of constructions is developed.

3. The technique of forecasting of durability of reinforced concrete constructions at influence of the hostile marine environment, taking into account repair of a constructions is developed and with use of probabilistic model of calculation.

4. Verification of results of probability calculations of refusal of reinforced concrete elements for the offered probabilistic model is executed.

Recommendations about practical use of results

The developed models allow to count the carbonization depth, concentration of ions of chloride at the set depth, the term of exploitation of a construction, time of possible repair and depth of possible restoration of a concrete protective layer for a coastal and shelf zone of the Far East.

The developed technique of forecasting of durability of reinforced concrete constructions at joint impact of carbonization and chloride aggression with use of final and differential calculation model is offered to be used with a depth of carbonization up to 8 mm.

The developed technique of forecasting of durability of reinforced concrete constructions at joint impact of carbonization and chloride aggression with use of probabilistic model of calculation can be used:

- at assessment of operational suitability (safety) at inspection of reinforced concrete constructions of coastal and shelf constructions;
- when forecasting service life of again projected reinforced concrete designs;
- when calculating necessary thickness of a concrete protective layer of the projected reinforced concrete constructions at the set service life and service conditions;
- when calculating service life of concrete in specific conditions of exploitation;
- when forecasting term of repair of the operated constructions.

The received results can be used in design of new constructions and/or repair (reconstruction) of the existing constructions, operated in aggressive conditions of the marine environment and also in educational process.

REFERENCES

1. Leonovich S. N., Shalyi E. E., Falaleeva N. A., Kim L. V. (2016) The Influence of Carbon Dioxide on the Durability of Offshore Concrete Structures. *International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2016)*, 26 June – 2 July, Rhodes, Greece.
2. Leonovich S. N., Kim L. V., Shalyi E. E. (2016) Prediction of Durability of Concrete Pier Number 5 in the Port of Petropavlovsk-Kamchatka. *Defekty Zdanii i Sooruzhenii. Usilenie Stroitel'nykh Konstruktsii: Sbornik Nauchnykh Statei XX Nauchno-Metodicheskoi Konferentsii VITU* [Defects of Buildings and Structures. Strengthening of Building Structures: Collection of Scientific Articles of the XX Scientific-Methodical Conference VITU]. St. Petersburg, VITU, 238–242 (in Russian).
3. Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N. (2016) Probability Calculation of Depth and Distribution of Carbonization Front in Concrete of Hydraulic Engineering Installations on the Khabarovsk Territory. *Innovatsii v Betonovedenii, Stroitel'nom Proizvodstve i Podgotovke Inzhenernykh 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).
4. Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N. (2016) Simulation Modeling of the Degradation of Reinforced Concrete Structures of Hydraulic Structures. *VI International "Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering"*. Vladivostok, FEPU, 175–177 (in Russian).
5. Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N. (2016) Probabilistic Calculation of the Depth and Spread of the Carbonization Front in Concrete Hydraulic Structures. *Perspektivnye Napravleniya Innovatsionnogo Razvitiya Stroitel'stva i Podgotovki Inzhenernykh Kadrov: Materialy XX Mezhdunarodnogo Nauchno-Metodicheskogo Seminara (Grodno, 17–19 Fevralya 2016 g.)* [Prospective Directions of Innovative Development of Construction and Training of Engineering Personnel: Materials of the XX International Scientific Method. Seminar (Grodno, February 17–19, 2016)]. Grodno, Yanka Kupala State University of Grodno, 328–333 (in Russian).
6. Leonovich S. N., Shalyi E. E., Kim L. V., Dzhogolyuk A. G. (2017) Degradation of Marine Reinforced Concrete Berth Structures on Sakhalin Island. *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2017)*, 25–30 June, San Francisco, California.
7. Leonovich S. N., Kim L. V., Shalyi E. E., Shalaya T. E. (2017) Prediction of the Service Life of the Concrete Berths of the Amursk Timber Terminal. *Defekty Zdanii i Sooruzhenii. Usilenie Stroitel'nykh Konstruktsii: Sbornik Nauchnykh Statei XXI Nauchno-Metodicheskoi Konferentsii VITU* [Defects of Buildings and Structures. Strengthening of Building Structures: Collection of Scientific Articles of the XXI Scientific-Methodical Conference VITU]. St. Petersburg, VITU, 172–177 (in Russian).
8. Shalyi E. E. (2018) Analysis of the Degradation of Concrete Structures on the Island of Sakhalin. *Vestnik Inzhenernoi Shkoly Dal'nevostochnogo Federal'nogo Universiteta = Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*, (1), 65–76 (in Russian).
9. Shalyi E. E., Kim L. V. (2018) The Chloride Corrosion of Marine Concrete. *Vestnik Inzhenernoi Shkoly Dal'nevostochnogo Federal'nogo Universiteta = Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*, (1), 101–110 (in Russian).
10. Shalyi E. E., Leonovich S. N., Kim L. V., Rummyantseva V. E., Budrevich N. A. (2018) Probabilistic Model of the Combined Effect of Carbonization and Chloride Aggression on Structural Concrete. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, (3), 123–131 (in Russian).

Received: 20.04.2018

Accepted: 26.06.2018

Published online: 31.07.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-292-302>

УДК 666.972; 693.54

Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства

Инж. М. М. Мордич¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В результате теоретических и экспериментальных исследований получен эффективный, не подверженный явлениям осадки и усадки теплоизоляционно-конструкционный материал – керамзитопенобетон в диапазоне основных применяемых в строительстве марок по средней плотности D300–D700, характеризующийся на 5–31 % большей прочностью и на 8–27 % модулем упругости, а также более высоким ($\leq 30,7$ %) уровнем паропроницаемости и влагоотдачи (на 17,4–46,7 %) при меньших (на 10,0–83,2 %) величинах водопоглощения, сорбционной влажности и теплопроводности по сравнению с ячеистым бетоном автоклавного твердения и пенобетоном равной плотности. Разработана трехстадийная технология приготовления керамзитопенобетона, на первой стадии которой готовят цементное тесто, куда при необходимости вводят оптимальное количество ускорителя твердения (1 % CaCl_2 от массы цемента) и уплотняющие структуру цементного камня (1 % Al_2SO_4 от массы цемента) добавки, предотвращающие осадку связующего (пенобетона) при последующем твердении, а в сочетании с 0,5 % от массы цемента «Гидроксипропилметилцеллюлозы УСК-200 ТТ» – и усадку пено- и керамзитопенобетона при последующем высыхании (высушивании). На второй стадии поризуют связующее, вводя в цементное тесто белковый пенообразователь Laston в оптимальном (в зависимости от заданной плотности) количестве примерно 0,5–1,3 % от массы цемента, а на третьей стадии в приготовленную пенобетонную смесь вводят керамзитовый гравий (в рациональном количестве примерно 0,7–0,8 м³ на 1 м³ керамзитопенобетона) при непрерывном смешивании в течение 60–90 с. Разработаны методики расчета состава пено- и керамзитопенобетона, обоснованы режимы формирования керамзитопенобетона высокой степени однородности (коэффициент вариации плотности и прочности $v_k \leq 6,2$ % при производственном формировании слоями высотой до 1500 мм), что подтверждает эффективность предлагаемой технологии.

Ключевые слова: цемент, пенообразователь, керамзит, пенобетон, керамзитопенобетон, технология, свойства, плотность, прочность, теплопроводность

Для цитирования: Мордич, М. М. Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства / М. М. Мордич // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 292–302. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-292-302>

Technology and Physico-Mechanical Properties of Claydite Foam Concrete for Monolithic and Prefabricated Construction

М. М. Mordzich¹⁾

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

Abstract. Theoretical and experimental investigations have resulted in obtaining an effective insulating and structural material (claydite foam concrete) that is not subjected to slump and shrinkage in the range of main grades used in construction in terms of average density D300–D700, characterized by 5–31 % greater strength and 8–27 % elasticity modulus, as well as a higher (≤ 30.7 %) level of vapor permeability and moisture return (by 17.4–46.7 %) with lower values (by 10.0–83.2 %) of water absorption, sorption moisture and thermal conductivity in comparison with aerated concrete of autoclave hardening and foam concrete of equal density. A three-stage technology has been developed for preparing claydite foam concrete. At the first stage cement dough is prepared and if it is necessary an optimum amount of hardening accelerator (1 % CaCl_2 from cement mass) and additives condensing cement stone structure (1 % Al_2SO_4 from cement mass) are introduced into it, they prevent slump of a binder (foam concrete) during the subsequent hardening, and in combination with 0.5 % from cement mass “Hydroxypromethylcellulose UCK-200 TT” – and shrinkage of foam and claydite foam concrete during the subsequent drying. At the second stage, the binder is aerated while introducing protein-based foam agent (Laston) into the cement dough

Адрес для переписки

Мордич Михаил Михайлович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25, корп. 1
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-75-84
niilbism@bntu.by

Address for correspondence

Mordzich Mikhail M.
Belarusian National Technical University
25, k. 1 F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-75-84
niilbism@bntu.by

in an optimal amount (depending on the given density) 0.5–1.3 % from the cement mass; and at the third stage, expanded clay gravel is introduced into prepared foam concrete mixture (in rational amount of approximately 0.7–0.8 m³ per 1 m³ of claydite foam concrete) with continuous mixing for 60–90 seconds. Methodologies for calculation of foam- and claydite foam concrete compositions have been developed; molding modes of expanded clay foam concrete with high degree of homogeneity (variation coefficient of density and strength $\nu_k \leq 6.2$ % in the process of manufacturing molding with layer height up to 1500 mm) have been justified that confirms efficiency of the proposed technology.

Keywords: cement, foam-producing agent, claydite, foam concrete, claydite foam concrete, technology, properties, density, strength, heat conductivity

For citation: Mordzich M. M. (2019) Technology and Physico-Mechanical Properties of Claydite Foam Concrete for Monolithic and Prefabricated Construction. *Science and Technique*. 18 (4), 292–302. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-292-302> (in Russian)

Введение

Одной из важнейших задач при строительстве и эксплуатации жилищного фонда Республики Беларусь является обеспечение требований к теплоизолирующей функции наружных ограждающих конструкций зданий. Поэтому совершенствование технологии получения энергоэффективных стеновых материалов, которые сочетали бы низкую теплопроводность с достаточными прочностными характеристиками, т. е. обеспечивали рациональное сочетание теплоизолирующей и несущей функций, представляет актуальную задачу.

Приведенным критериям в наибольшей мере соответствуют легкие бетоны поризованной структуры, в частности производимые в нашей стране изделия из автоклавного ячеистого бетона на основе известково-кремнеземистого вяжущего с использованием извести-кипелки. Эта технология ориентирована на производство штучных изделий заводского изготовления. С расширением строительства из монолитного бетона появилась потребность в технологии ячеистого бетона, которая могла бы обеспечить условия возведения ограждающих конструкций с требуемым термическим сопротивлением теплопередаче монолитным способом. Традиционная технология ячеистого бетона такие условия не обеспечивает. В этой связи перспективно использование в монолитном строительстве ячеистого бетона, полученного с применением пенообразователей, т. е. пенобетона [1–3].

Однако в процессе исследований и практического использования выявились недостатки пенобетона, которые связаны с нестабильностью свойств пенобетонных смесей, что затем проявляется в повышенной осадке (и усадке) и неоднородности структуры и свойств затвердевшего материала, т. е. в уровне и постоянстве его физико-технических показателей, определяющих качество конечной продукции. Решение данной задачи заключается в создании конгломератного материала – керамзитопенобетона, полученного с применением особо легкого

керамзитового заполнителя ($\rho_0^k \leq 400$ кг/м³) и пенобетонного связующего со средней плотностью $\rho_{cp} \sim (200–800)$ кг/м³, что позволило получить материал с однородной (не подверженной осадке) структурой в диапазоне средней плотности 300–700 кг/м³, обеспечивающий требуемые теплофизические и прочностные характеристики для возводимых стеновых (внутренних и наружных) и иных строительных конструкций.

Технология приготовления поризованного связующего компонента – пенобетона

Для получения керамзитопенобетона с необходимыми свойствами в диапазоне марок по средней плотности D300–D700 нужно подобрать пенобетон с оптимальными физико-механическими свойствами. Учитывая, что плотность керамзитопенобетона зависит от средних плотностей обоих компонентов, а получение керамзита с насыпной плотностью менее 400 кг/м³ (и тем более, менее 300 кг/м³) проблематично, на первом этапе получили пенобетон в диапазоне марок D200–D600 (табл. 1).

В процессе исследований были определены наиболее рациональный (среди получивших предварительную оценку разновидностей пенообразователей) вид и оптимальное количество пенообразователя – Laston, составивший для пенобетона разных марок по плотности примерно 0,5–1,3 % от массы цемента (МЦ), который использовали в последующих экспериментах, обеспечивая получение пенобетона марок D200–D600. С целью снижения отрицательного эффекта осадки-усадки и повышения прочности затвердевшего пенобетона в состав вводили химические добавки различного функционального назначения. В результате экспериментально подобран комплекс из оцениваемых добавок ускорителей твердения CaCl₂ и Na₂SO₄ и уплотняющей структуру цементного камня добавки Al₂(SO₄)₃ (рис. 1, 2).

Таблица 1

Физико-механические свойства пенобетона плотностью марок D200–D600 на синтетическом (ПБ 2000) и протениновом (Laston) пенообразователях (для образцов 100×100×100 мм, выпиленных из 1000 мм призмы)

Physical and mechanical properties of foam concrete with density of D200–D600 grades on synthetic (ПБ 2000) and protein (Laston) frothers (for specimens 100×100×100 mm being cut-out from 1000 mm prism)

Плотность				Среднее	ν, ρ_n	Предел прочности на сжатие в сухом состоянии, МПа			Среднее	ν, R_n
расчет- ная	фактическая в сухом состоянии					Нижний	Средний	Верхний		
	Нижний	Средний	Верхний							
D200	Полностью осел			—	—	—	—	—	—	
D200*	220	210	195	208	0,06	0,16	0,15	0,12	0,14	0,14
D300	Осадка в форме $h = 1000$ мм составила 46 %, или 460 мм									
D300*	310	300	298	303	0,02	0,33	0,32	0,29	0,32	0,07
D400	460	420	390	423	0,08	0,59	0,52	0,49	0,53	0,10
D400*	420	410	400	410	0,02	0,75	0,73	0,70	0,73	0,03
D500	550	530	496	525	0,05	1,15	0,95	0,81	0,97	0,17
D500*	515	502	498	505	0,02	1,36	1,32	1,28	1,32	0,03
D600	664	630	590	628	0,06	1,36	1,30	1,26	1,31	0,04
D600*	610	604	592	602	0,01	1,64	1,62	1,60	1,62	0,01
Примечание. Со звездочкой – применялся протеиновый пенообразователь Laston; без звездочки – синтетический ПБ 2000.										

Примечание. Со звездочкой – применялся протеиновый пенообразователь Laston; без звездочки – синтетический ПБ 2000.

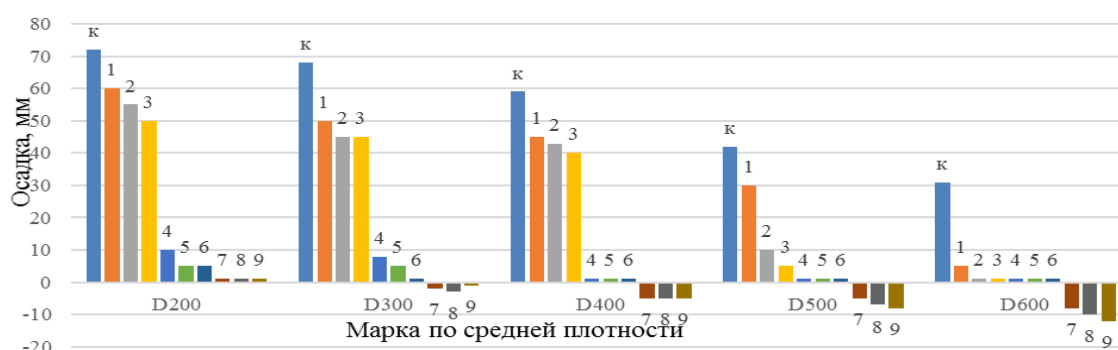


Рис. 1. Зависимость величины осадки пенобетона от вида и расхода добавки ускорителя твердения, в % от массы цемента, для различных марок по средней плотности D: 1 – 1,0 % Na_2SO_4 ; 2 – 2,0 % Na_2SO_4 ; 3 – 3,0 % Na_2SO_4 ; 4 – 1,0 % CaCl_2 ; 5 – 2,0 % CaCl_2 ; 6 – 3,0 % CaCl_2 ; 7 – 1,0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 8 – 2,0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 9 – 3,0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; к – контрольный состав без добавок

Fig. 1. Dependence of slump value for foam concrete on type and consumption of additive for hardening accelerator, in % by weight of cement, for various grades of average density D: 1 – 1.0 % Na_2SO_4 ; 2 – 2.0 % Na_2SO_4 ; 3 – 3.0 % Na_2SO_4 ; 4 – 1.0 % CaCl_2 ; 5 – 2.0 % CaCl_2 ; 6 – 3.0 % CaCl_2 ; 7 – 1.0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 8 – 2.0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 9 – 3.0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; к – control composition without additives

Влияние вида и количества вводимой в смесь добавки на свойства пенобетонной смеси и затвердевшего пенобетона оценивали по двум показателям:

– устойчивости к осадке «массива» из укладываемой за один прием в форму высотой 1000 мм (сечением 100×100 мм) пенобетонной смеси при твердении в течение 24 ч (рис. 1);

– изменению прочности пенобетона на сжатие в возрасте 3; 7 и 28 сут. (рис. 2).

Прочность определяли на образцах (по 6 шт. в серии) размерами 100×100×100 мм, отобран-

ных из средней части по высоте исходного «массива» пенобетона марок D200–D600, хранившихся до испытаний в камере нормально-влажностного твердения. Из результатов экспериментов следует, что развитие реакций вещества $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ с гипсовой составляющей цемента в водной среде с образованием крупных кристаллогидратов этрингита (при сопутствующем увеличении объема) способствует стабилизации структуры твердеющего камня. Этот вывод подтверждается незначительным ростом объема (высоты образцов с открытой верхней грани) пенобетона (рис. 1, поз. 7, 8, 9).

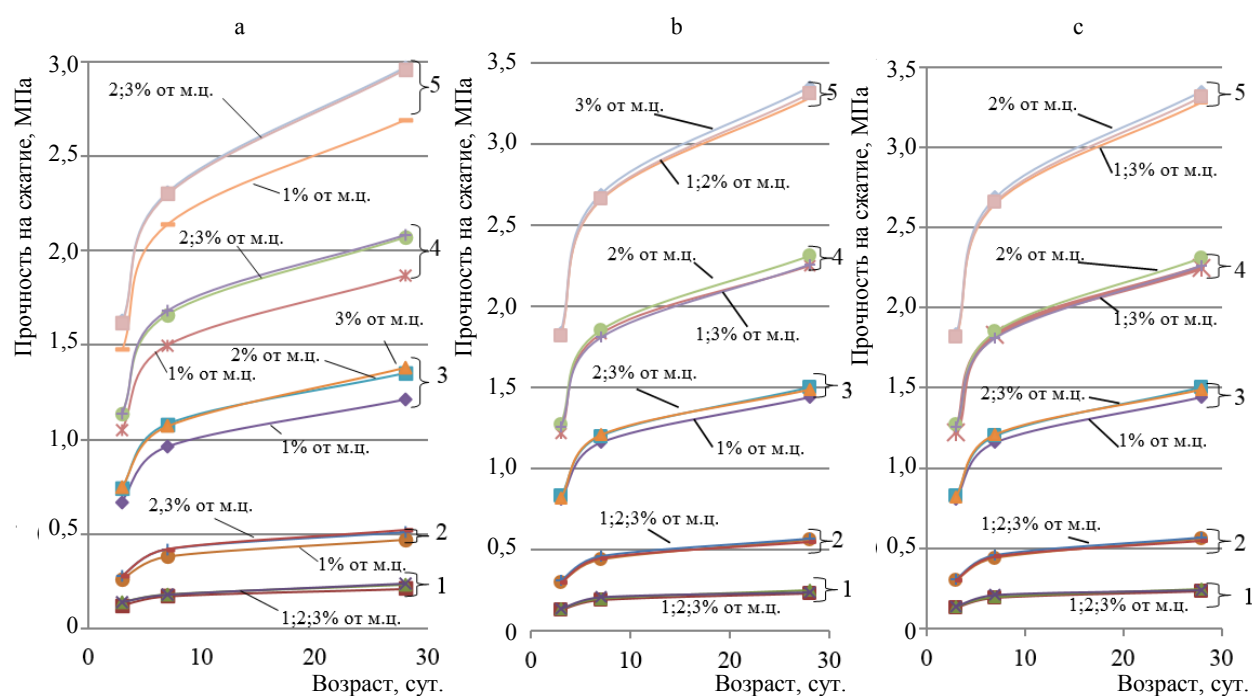


Рис. 2. Зависимость изменения прочности пенобетона на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 сут. от вида добавки (а – Na_2SO_4 ; б – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; в – CaCl_2) и средней плотности пенобетона (1 – D200; 2 – D300; 3 – D400; 4 – D500; 5 – D600)

Fig. 2. Dependence of change in foam concrete strength in compression at age of 3, 7 and 28 days, on type of additive (а – Na_2SO_4 ; б – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; в – CaCl_2) and average density of foam concrete (1 – D200; 2 – D300; 3 – D400; 4 – D500; 5 – D600)

Одновременно установлен рост температуры твердеющего пенобетона с добавками в сравнении с составом без них, который составил для Na_2SO_4 $\sim(2-3)^\circ\text{C}$, для CaCl_2 $\sim(4-5)^\circ\text{C}$ и для $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ $\sim 7^\circ\text{C}$, отражая нарастающую активизацию процесса гидратации цемента в их присутствии. Изменение прочности образцов (серии по 6 шт.) затвердевшего пенобетона с добавками (рис. 2) свидетельствует о примерно равной эффективности применения добавок $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и CaCl_2 , и меньшей – Na_2SO_4 .

Наиболее эффективным в пенобетоне оказался комплекс из добавок CaCl_2 и Al_2SO_4 в их оптимальной дозировке, составляющей 1 % CaCl_2 + 1 % Al_2SO_4 от МЦ, который обеспечил ускорение роста пластической прочности и схватывания пенобетонной смеси для всего диапазона марок пенобетона по средней плотности (D200–D600), а также способствовал повышению темпа роста и уровня прочности пенобетона указанных марок до 150–180 % (т. е. в 1,5–1,8 раза) [4]. Одновременно это сочетание добавок исключает осадку пенобетонной смеси, характерную для пенобетона без них в начальные сроки (1 сут.) твердения, а в более поздние сроки – ограничивает усадочные явления, включая влажностную усадку при высушивании пенобетона. Экспери-

ментально установлено, что в наибольшей мере эффективно их сочетание с добавкой метилцеллюлозы, в частности с «Гидроксипропилметилцеллюлозой УСК-200 ТТ» в дозировке 0,5 % от МЦ, что практически исключило усадку при высушивании пенобетона [5].

Также экспериментально выявлена эффективность (рис. 3) введения в пенобетон углеродного наноматериала (УНМ) белорусского производства, обеспечившего рост прочности пенобетона до 50 % к 7 сут. твердения и до 30 % – в проектом 28-суточном возрасте. Выявлена рациональная его разновидность (УНМ-ПХР) среди других, представленных разработчиком (ООО «Инновационные технологии», г. Минск) [6–8], а также установлены оптимальная дозировка этого вида УНМ, равная $(0,025 \pm 0,005) \%$ от МЦ, и способ его введения в пенобетонную смесь в виде водной дисперсии, приготовленной на 1%-м растворе пластифицирующей добавки первой группы. Молекулы последней создают у поверхности частиц УНМ «экранирующую» оболочку, обеспечивая сохранение свойств пены, так как частицы УНМ без пластификатора способны снижать ее устойчивость («прорезать» пену).

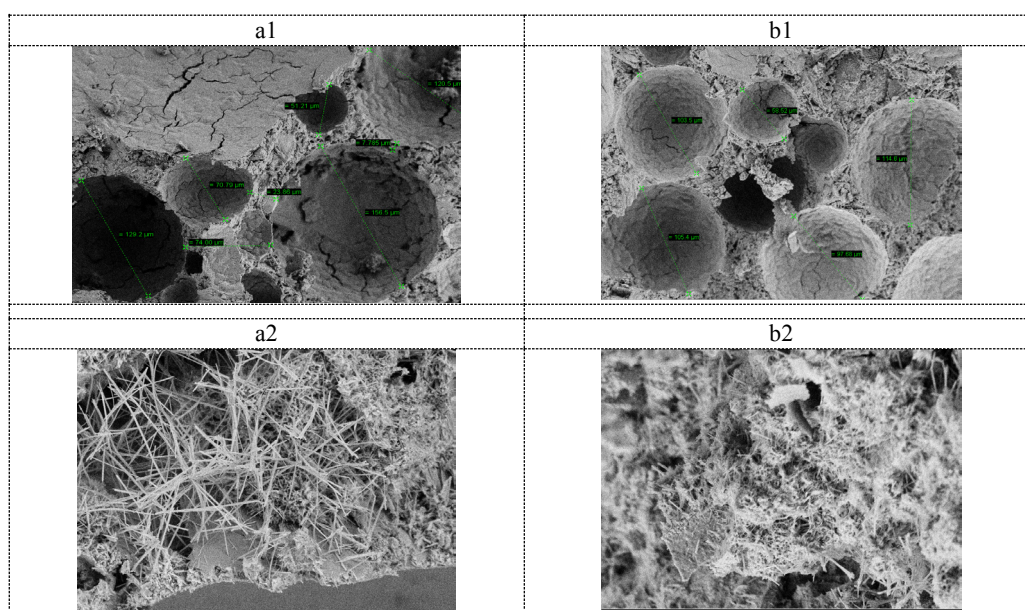


Рис. 3. Фотографии микроstructures пенобетона на микроскопе SUPRA 55-30-44: a1, a2 – контрольный пенобетон при увеличении 20 мкм и 2 мкм в 1 см соответственно; b1, b2 – пенобетон с УНМ при увеличении 20 мкм и 2 мкм в 1 см

Fig. 3. Photos of foam concrete microstructure on SUPRA 55-30-44 microscope: a1, a2 – control foam concrete with increase of 20 μm and 2 μm in 1 cm, respectively; b1, b2 – foam concrete with CNM with increase of 20 μm and 2 μm in 1 cm

Результаты электронной микроскопии (рис. 3) свидетельствуют, что введение УНМ в пенобетон в оптимальной дозировке обеспечило формирование более упорядоченной микроstructures цементного камня в стенках пор, а также макроstructures пенобетона в целом, что и является основой роста его прочности.

Экспериментально выявленные особенности технологии получения пенобетона с заданными свойствами создали необходимые предпосылки для разработки технологии керамзитопенобетона.

Технология приготовления керамзитопенобетона

Выявлены зависимости формовочных свойств керамзитопенобетонных смесей (в диапазоне указанной средней плотности) от объемного содержания (расхода) керамзитового гравия (рис. 4).

В процессе экспериментов установлено, что метод определения формуемости керамзитопенобетонной смеси по осадке стандартного конуса не пригоден для оценки этого показателя, так как полученные данным методом результаты несопоставимы. Одновременно установили приемлемость использования оценки по распылу конуса (РК), обеспечившей сопоставимость результатов независимо от консистенции

керамзитопенобетонной смеси и изменения объемного содержания в нем керамзитового гравия (рис. 4). Из результатов экспериментов очевидна тенденция к снижению формуемости керамзитопенобетонной смеси с увеличением дозировки крупного керамзитового заполнителя (особенно, если его расход превышал 0,8 м^3 на 1,0 м^3 керамзитопенобетона), что предопределило необходимость использования пластифицирующих добавок.

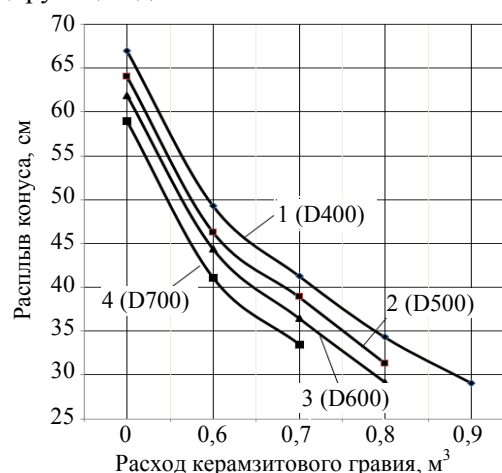


Рис. 4. Зависимость подвижности (пластичности) керамзитопенобетонной смеси от расхода керамзитового гравия

Fig. 4. Dependence of mobility (plasticity) for claydite foam concrete mix on consumption of expanded clay gravel

В графической интерпретации на рис. 5 приведены экспериментальные данные, отражающие влияние на формуемость керамзитопенобетонной смеси пластифицирующих добавок первой группы – суперпластификатора С-3 и добавки с повышенным водоредуцирующим эффектом – гиперпластификатора с маркировкой «Стахемент 2000» на примере смеси керамзитопенобетона средней плотностью марки D600.



Рис. 5. Зависимость формуемости (пластичности) керамзитопенобетонной смеси от расхода керамзитового гравия и вида примененной добавки:

1 – 0,5 % «Стахемент-2000» от массы цемента;

2 – 2,0 % С-3 от массы цемента

Fig. 5. Dependence of formability (plasticity) of claydite foam concrete mix on consumption of expanded clay gravel and type of applied additive:

1 – 0.5 % “Stachement-2000” from MC;

2 – 2.0 % C-3 from MC

Выявлена тенденция роста эффективности пластификатора в смеси с повышением содержания в ней керамзита. По мнению автора, это связано с адсорбцией молекул ПАВ на поверхности зерен заполнителя и со снижением сил взаимодействия между его поверхностью и вязкопластичной массой пенобетонной смеси в зонах их контакта [4, 9, 10].

В результате установлено, что приемлемый для формирования керамзитопенобетонной смеси уровень расплыва конуса (≥ 30 см) может быть обеспечен при «предельном» объемном содержании в ней до 1 м³ керамзитового гравия (рис. 5, график 1).

Одной из задач при разработке технологии получения и практического применения керамзитопенобетона однородной структуры и свойств являлось определение допустимой высоты слоя смеси, одновременно укладываемой в опалубку (форму). Оценку однородности структуры керамзитопенобетона осуществили по данным о скорости прохождения ультразвукового импульса (далее – скорости ультразвука) (ГОСТ 17624–2012), а также по величинам его средней плотности и прочности (ГОСТ 12730.1–78 и ГОСТ 10180–2012), определенным для разных участков высоты образцов, отформованных за один прием и имитирующих фрагмент стены размерами в плане 90×400 мм при высоте 800 мм (рис. 6).

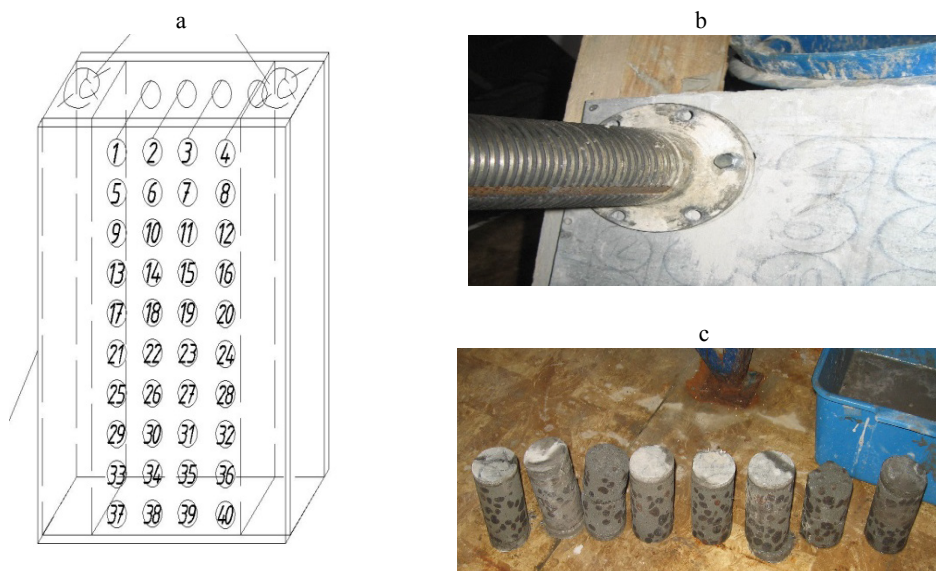


Рис. 6. Схема расположения мест оценки скорости ультразвука (а) и выбуривания (б) образцов (с) для оценки плотности и прочности

Fig. 6. Arrangement of locations for evaluating speed of ultrasound (a) and for cutting (b) out samples (c) for estimation of density and strength

Для оценки принят состав керамзитопенобетона марки D500 (содержащий $0,8 \text{ м}^3$ заполнителя), как примерно средний из диапазона марок D300–D700.

Экспериментально установлена стабильность свойств керамзитопенобетона по скорости прохождения ультразвука (в 40 точках) и по значениям средней плотности и прочности (на сжатие) при испытаниях образцов-цилиндров ($\varnothing 60 \text{ мм}$, высота 90 мм; в серии – 6 шт.), отобранных из образцов-блоков после проведения испытаний ультразвуком (табл. 2).

Полученные данные подтвердили высокую степень однородности структурного строения оцениваемого керамзитопенобетона, его плотности и прочности, а также отсутствие осадки слоя керамзитопенобетона высотой 800 мм в процессе твердения как в начальные сроки, так и в проектном возрасте. Для пенобетона такой результат был обеспечен использованием комплекса химических добавок 1 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + 1 % CaCl_2 (рис. 1), которых в рассматриваемом случае в пенобетонной составляющей не было. Очевидно проявление структурирующей роли «каркаса» из зерен керамзита в керамзитопенобетоне, а также то, что снижению осадки в начальный период и усадки при последующем твердении керамзитопенобетона способствовало снижение водотвердого (водоцементного) ($\Delta \text{В/Т}$) отношения за счет водоредуцирующего эффекта примененного пластификатора, составившего для 0,5 % «Стахемент 2000» ~30 %. В итоге практически отсутствовала осадка данного образца и других, формуемых для последующих экспериментов.

Одновременно решали одну из задач исследований, заключающуюся в определении оптимального содержания (расхода) крупного заполнителя в керамзитопенобетоне с позиций влияния на свойства керамзитопенобетона. Результаты испытаний на прочность приведены в виде графиков на рис. 7 в зависимости от расхода керамзитового гравия. Образцы марок D400 (рис. 7, линия 1), D500 (линия 2) приготовлены на керамзитовом гравии фракции 4–10 мм, $\rho_{\text{кг}}^0 = 370 \text{ кг/м}^3$, прочность при сдавливании в цилиндре 1,9 МПа (производство ОАО «Завод керамзитового гравия», г. Новолюкомль), а марки D600 (линия 3) – на керамзито-

вом гравии фракции 4–10 мм, $\rho_{\text{кг}}^0 = 530 \text{ кг/м}^3$, прочность при сдавливании в цилиндре 2,5 МПа (производство Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК»). При этом экспериментально выявлена неоднозначная зависимость средней плотности и прочности керамзитопенобетона от соотношения плотности и прочности связующего (пенобетона) и керамзитового гравия. Установлено, что для получения керамзитопенобетона марок D400 и D500 на особо легком керамзите ($\rho_{\text{кг}}^0 = 370 \text{ кг/м}^3$, прочность 1,9 МПа) следует использовать пенобетон соответствующей средней плотности, но не более D500, и прочностью не менее 2,0 МПа. При этом прочность на сжатие керамзитопенобетона возрастает с увеличением дозировки гравия вплоть до $1,0 \text{ м}^3$ керамзитопенобетона (рис. 7, линии 1, 2). С ростом средней плотности (марки D600 и более) необходимо использовать более прочный заполнитель (при сдавливании в цилиндре не менее 2,5 МПа), а в качестве связующего – пенобетон соответствующей марки по средней плотности, либо даже меньшей плотности (но не менее D350), при прочности не менее 1,2 МПа. Эти положения были учтены при разработке методики расчета составов керамзитопенобетона в диапазоне марок D300–D700. По совокупности приведенных экспериментальных данных сделан вывод, что оптимальное объемное содержание крупного заполнителя в керамзитопенобетоне соответствует примерно $0,7\text{--}0,8 \text{ м}^3$ на $1,0 \text{ м}^3$ бетона, и последующие исследования были выполнены на составах с учетом этого фактора.

Разработанный керамзитопенобетон – конструкционно-теплоизоляционный материал, для применения которого необходимы расчетные физико-механические характеристики, в частности – модуль упругости. Экспериментально установленная зависимость изменения модуля упругости керамзитопенобетона в диапазоне марок D400–D700 приведена на рис. 8. Для сравнения показаны его величины для равной средней плотности газосиликатного бетона по данным М. З. Симонова и С. М. Ицковича [11, 12] и для пенобетона – по данным И. Х. Назашвили и В. С. Дорофеева [13, 14].

Таблица 2

Результаты испытаний керамзитопенобетона марки D500 на однородность

Test results on claydite foam concrete of D500 grade for uniformity

№ ряда при отборе образцов по высоте	Среднее значение			Величина коэффициента вариации, отражающая однородность керамзитопенобетона, доли ед. (%)				
	v_{cp} , м/с	ρ_{cp} , кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	По скорости ультразвука			По средней плотности	По прочности
				По горизонтали	По вертикали	Средняя		
1 (верх)	2261,67	498	2,61	0,0316 (3,16)	0,0313 (3,13)	0,0314 (3,14)	0,0119 (1,2)	0,0415 (4,15)
2	2365,5	502	2,62					
3	2439,25	503	2,69					
4	2489,25	504	2,61					
5	2491,08	508	2,62					
6	2475,75	511	2,68					
7	2457,67	512	2,65					
8 (низ)	2411,75	516	2,65					

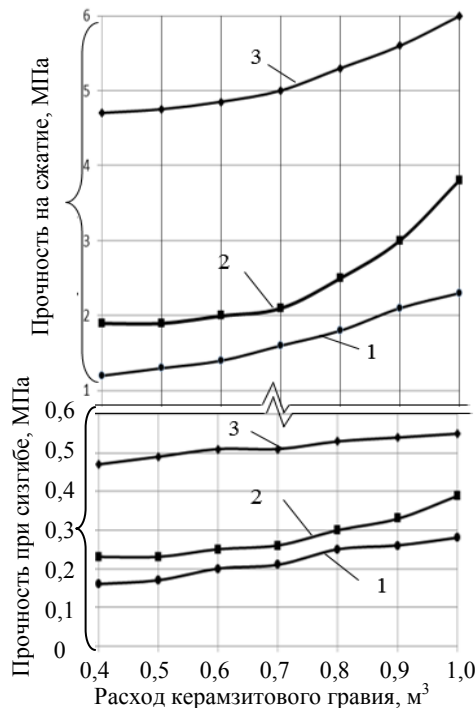


Рис. 7. Тенденция изменения прочности керамзитопенобетона

Fig. 7. Tendency to change strength of claydite foam concrete

Очевидно, что по упругим свойствам керамзитопенобетон не только не уступает, но и несколько превосходит газосиликатный бетон автоклавного твердения (рис. 8, линия 2) и, тем более, пенобетон (линия 3).

Далее были определены основные эксплуатационные свойства керамзитопенобетона (во-

доп поглощение, влагоотдача, сорбционная влажность, паропроницаемость, теплопроводность и термическое сопротивление), подтверждающие возможность и эффективность его использования в наружных ограждающих конструкциях (табл. 3).

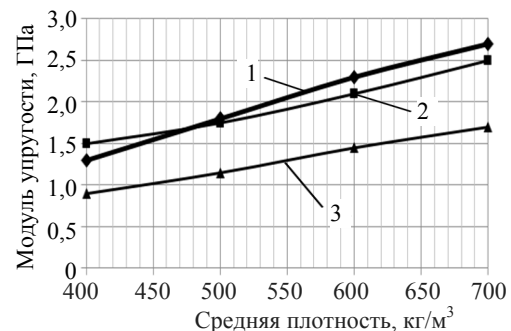


Рис. 8. Значения модуля упругости для: 1 – керамзитопенобетона во взаимосвязи с его средней плотностью; 2 – газосиликатного бетона; 3 – пенобетона

Fig. 8. Values of elastic modulus for: 1 – expanded clay foam concrete in relation to its average density; 2 – gas silicate concrete; 3 – foam concrete

При проектировании и устройстве наружных ограждающих конструкций из керамзитопенобетона следует обеспечивать требуемую величину термического сопротивления. На территории Республики Беларусь оно, согласно ТКП 45-2.04-43–2006, должно быть не менее $R_m \sim 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, с перспективой дальнейшего повышения. В расчетах исходили из предположения, что керамзитопенобетон будет исполь-

зоваться в варианте устройства однослойной ограждающей конструкции, так как это наиболее экономически целесообразно. В этой связи при оценке обеспечиваемого термического сопротивления стен (или иных конструкций) разной толщины, возведенных (устроенных) из керамзитопенобетона разных марок по плотности, в расчет принимали только слой керамзитопенобетона (табл. 4).

Согласно данным табл. 4, требуемый коэффициент термического сопротивления ($R_m \geq 3,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$) обеспечивается одним слоем

керамзитопенобетона толщиной от ~ 290 мм до ~ 570 мм в диапазоне марок от D300 до D700 соответственно, что меньше (за счет меньшей теплопроводности), чем для пено- и газобетона равных марок по средней плотности. При этом керамзитопенобетон обеспечивает (как это установлено проведенными исследованиями) возможность возведения монолитных стеновых конструкций в опалубке с высокой степенью однородности свойств по высоте конструкций и темпом ведения бетонных работ.

Таблица 3

**Физико-механические и эксплуатационные свойства керамзитопенобетона
при расходе керамзитового гравия $\sim 0,8 \text{ м}^3$**

**Physical and mechanical and operational properties of claydite foam concrete
with consumption of $\sim 0,8 \text{ м}^3$ expanded claydite gravel**

Наименование показателя	Свойство керамзитопенобетона в зависимости от марок по средней плотности			
	D400	D500	D600	D700
Прочность на сжатие (кубиковая), МПа	1,8	2,5	5,3	5,9
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	0,25	0,30	0,53	0,61
Призменная прочность, МПа	1,3	2,3	3,4	4,3
Модуль упругости, ГПа	1,3	1,8	2,3	2,7
Водопоглощение (по массе), %	47,3	31,9	23,3	20,2
Сорбционная влажность, %, при:				
$\varphi_{\text{возд}} \sim 40$	—	0,89	—	—
$\varphi_{\text{возд}} \sim 60$	—	1,12	—	—
$\varphi_{\text{возд}} \sim 100$	—	5,32	—	—
Влагоотдача (до стабилизации), %	21,8	14,1	11,1	10,3
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,260	0,241	0,231	0,219
Теплопроводность*, Вт/(м·°C)	0,099	0,121	0,137	0,177
* Для марки D300 – $\lambda \sim 0,09 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.				

Таблица 4

**Расчетный коэффициент термического сопротивления строительных конструкций
при устройстве их из керамзитопенобетона**

**Estimated coefficient of thermal resistance of building structures
while making them from expanded clay foam concrete**

Коэффициент термического сопротивления, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Толщина слоя, м, керамзитопенобетона, обеспечивающая данное термическое сопротивление в зависимости от его средней плотности				
	D300	D400	D500	D600	D700
3,2	0,288	0,317	0,387	0,438	0,566
4,0	0,360	0,396	0,484	0,548	0,708
5,0	0,450	0,495	0,605	0,685	0,885

ВЫВОДЫ

1. Разработанная трехстадийная технология получения и применения в строительстве керамзитопенобетона марок по средней плотности D300–D700 обладает преимуществом по физико-механическим характеристикам и эксплуатационным свойствам перед известными бетонами – аналогами ячеистой структуры. Установленные режимы двухстадийного приготовления пенобетонного связующего марок по средней плотности D200–D800 с требуемыми свойствами, обеспечивающими затем заданные качественные характеристики и свойства керамзитопенобетона в диапазоне марок D300–D700, приготавливаемого на третьей стадии путем введения в пенобетонную смесь керамзитового гравия в объеме 0,7–1,0 м³ при непрерывном смешивании в течение 60–90 с.

2. Выявлены наиболее эффективный вид и оптимальная дозировка (примерно 0,5–1,3 % от массы цемента в зависимости от марки по средней плотности) белкового пенообразователя Laston, а также наиболее рациональное сочетание ускорителя твердения CaCl₂ и уплотняющей структуру цементного камня добавки Al₂SO₄ и их оптимальная дозировка (1 % CaCl₂ + 1 % Al₂SO₄), которая обеспечивает исключение осадки пенобетонной смеси, характерной для пенобетона без этих добавок, в начальные сроки (1 сут.) твердения, а в более поздние сроки – ограничивает усадочные явления, включая влажностную усадку при его высушивании. Кроме этого, указанный комплекс добавок способствует повышению темпа роста и уровня прочности пенобетона до 150–180 % (т. е. в 1,5–1,8 раза), а в сочетании с добавкой «Гидроксипропилметилцеллюлоза УСК-200 ТТ» (в дозировке 0,5 % от массы цемента) практически исключает усадку при высушивании как пенобетона, так и керамзитопенобетона.

3. Установлена возможность повышения прочности связующего (пенобетона) до 50 % к 7 сут. твердения и до 30 % – в проектном 28-суточном возрасте за счет введения в состав углеродного наноматериала (УНМ-ПХР) в оптимальной дозировке (0,025 ± 0,005) % от массы цемента; разработан способ его введения в виде водной дисперсии, предварительно приготовленной на 1%-м водном растворе добавки пла-

стификатора первой группы (суперпластификатора). Выявлено, что адсорбция молекул ПАВ пластификатора на поверхности частиц УНМ обеспечивает его эффективность в пенобетоне; в противном случае частицы УНМ «прорезают» пену и прочность пенобетона снижается.

4. Выявлено, что полученный по разработанной технологии керамзитопенобетон на 5–31 % характеризуется большими значениями прочности и на 8–27 % – модуля упругости, на 10,0–83,2 % меньшими величинами водопоглощения и сорбционной влажности, а также обладает более высокой (на ≤30,7 %) способностью к влагоотдаче и паропроницаемости (на 17,4–46,7 %) при меньшей (на 5–12 %) теплопроводности в сопоставлении с газосиликатным ячеистым бетоном автоклавного твердения и пенобетоном равных марок по средней плотности [15].

5. Производственная апробация результатов исследований подтвердила эффективность разработки за счет снижения материало- и трудоемкости возведения (устройства) конструкций зданий. Общий экономический эффект при объеме реализации керамзитопенобетона в 3020 м³ составил около 33915 дол. США (по курсу на декабрь 2018 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, Д. Д. Теплоизоляционные материалы и изделия / Д. Д. Жуков // Белорусский строительный рынок. 1999. № 14. С. 2–7.
2. Лыгач, И. О. Новые материалы и технологии для строительства зданий из легких энергоэффективных конструкций / И. О. Лыгач, М. М. Мордич // Архитектура и строительство. 2009. № 3. С. 34–37.
3. Лыгач, И. О. Новые материалы и технологии для возведения легких энергоэффективных зданий / И. О. Лыгач, М. М. Мордич // Белорусский строительный рынок. 2008. № 8. С. 8–11.
4. Мордич, М. М. Влияние ускорителей твердения на физико-механические показатели качества пенобетона для монолитного строительства / М. М. Мордич // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: материалы XX Междунар. науч.-метод. сем. ГрГУ имени Я. Купалы, Гродно, 2016 г. Гродно, 2016. С. 147–152.
5. Мchedlov-Petrosyan, O. P. Расширяющиеся составы на основе портландцемента (химия и технология) / О. П. Мchedlov-Petrosyan. М.: Стройиздат, 1965. 137 с.
6. Батяновский, Э. И. Теоретические предпосылки и эффективность использования углеродных наноматериалов в цементном бетоне / Э. И. Батяновский, П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович // Проблемы современного

- бетона и железобетона: сб. тр.: в 2 ч. / редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. Минск: Минсктиппроект, 2009. Ч. 2: Технология бетона. С. 100–117.
7. Рябчиков, П. В. Перспективы применения углеродных наноматериалов в технологии тяжелого бетона / П. В. Рябчиков, Э. И. Батяновский // ALITinform – Международное аналитическое обозрение «Цемент. Бетон. Сухие смеси». 2015. Т. 41, № 6. С. 26–35.
 8. Батяновский, Э. И. Особенности применения углеродных наноматериалов в конструкционно-теплоизоляционных пенобетонах / Э. И. Батяновский, М. М. Мordich, Г. С. Галузо // Наука – образованию, производству и экономике: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2011 г. Минск: БНТУ, 2011. С. 272–273.
 9. Киселев, Д. П. Поризованные легкие бетоны / Д. П. Киселев, А. А. Кудрявцев. М.: Стройиздат, 1966. 81 с.
 10. Тихомиров, В. Н. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В. Н. Тихомиров. М.: Химия, 1983. 264 с.
 11. Симонов, М. З. Основы технологии легких бетонов / М. З. Симонов. М.: Стройиздат, 1973. 584 с.
 12. Ицкович, С. М. Легкие бетоны / С. М. Ицкович, Г. С. Галузо. Минск, 1981. 25 с.
 13. Наназашвили, И. Х. Строительные материалы, изделия и конструкции / И. Х. Наназашвили. М.: Высш. шк., 1990. С. 140–150.
 14. Прочностные и деформативные свойства бетонов и конструкций на пористых заполнителях юга Украины / В. С. Дорофеев [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр.: в 2 ч. / Мин-во стр-ва и арх. Респ. Беларусь, Науч.-исслед. респ. предпр. по стр-ву «Институт БелНИИС»; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. Минск: Минсктиппроект, 2009. Ч. 2: Технология бетона. С. 189–207.
 15. Кривицкий, М. Я. Ячеистые бетоны: технология, свойства и конструкции / М. Я. Кривицкий, Н. И. Левин, В. В. Макаричев. М.: Стройиздат, 1972. 136 с.
- Поступила 22.03.2019
Подписана в печать 29.05.2019
Опубликована онлайн 31.07.2019
- REFERENCES
1. Zhukov D. D. (1999) Thermal-Insulating Materials. *Belorussky Stroitelny Rynok* [Belarusian Construction Market], (14), 2–7 (in Russian).
 2. Lygach I. O., Mordich M. M. (2009) New Materials and Technologies for Construction of Buildings From Light Power-Efficient Structures. *Arkitektura i Stroitelstvo* [Architecture and Construction], (3), 34–37 (in Russian).
 3. Lygach I. O., Mordich M. M. (2008) New Materials and Technologies for Construction of Light Energy-Saving Buildings. *Belorussky Stroitelny Rynok* [Belarusian Construction Market], (8), 8–11 (in Russian).
 4. Mordich M. M. (2016) Influence of Hardening-Accelerating Agent on Physical and Mechanical Indices of Foam Concrete Quality for Cast-In-Situ Construction. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov: Materialy XX Mezhdunar. Nauch.-Metod. Sem. GrGU imeni Ya. Kupaly, Grodno, 2016 g.* [Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel: Proceedings of XX International Scientific and Methodological Workshop of Yanka Kupala State University of Grodno, 2016]. Grodno, 2016, 147–152 (in Russian).
 5. Mchedolov-Petrosyan O. P. (1965) *Portland Cement-Based Expanding Composition (Chemistry and Technology)*. Moscow, Stroyizdat Publ. 137 (in Russian).
 6. Batyanovsky E. I., Ryabchikov P. V., Yakimovich V. D. (2009) Theoretical Prerequisites and Efficiency for Use of Carbonic Nano-Materials in Cement Concrete. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Tr. Ch. 2. Tekhnologiya Betona* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Collected Papers. Part 2. Concrete Technology] Minsk, Minsktiproyekt Publ., 100–117 (in Russian).
 7. Ryabchikov P. V., Batyanovsky E. I. (2015) The Prospects of Application of Carbon Nanomaterials in the Heavy Concrete Technology. *ALITinform – Mezhdunarodnoe Analiticheskoe Obozrenie "Tsement. Beton. Sukhie Smesi" = ALITinform – International Analytical Review "Cement. Concrete. Dry Mix"*, 41 (6), 26–35 (in Russian).
 8. Batyanovsky E. I., Mordich M. M., Galuzo G. S. (2011) Peculiar Features for Application of Carbonic Nano-Materials in Constructional and Thermal Insulation Foam Concrete. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu i Ekonomike: Materialy IX Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 2011 g.* [Science for Education, Industry and Economics: Proceedings of IX International Scientific and Technical Conference, Minsk, 2011]. Minsk, Belarusian National Technical University, 272–273 (in Russian).
 9. Kiselev D. P., Kudryavtsev A. A. (1966) *Light-Weight Porous Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ. 81 (in Russian).
 10. Tikhomirov V. N. (1983) *Foam. Theory and Practice for its Obtaining and Destruction*. Moscow, Khimiya Publ. 264 (in Russian).
 11. Simonov M. Z. (1973) *Fundamentals of Technology for Light-Weight Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ. 584 (in Russian).
 12. Itskovich S. M., Galuzo G. S. (1981) *Light-Weight Concrete*. Minsk, 1981. 25 (in Russian).
 13. Nanazashvili I. Kh. (1990) *Construction Materials, Products and Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 140–150 (in Russian).
 14. Dorofeev V. S. [et al.] Strength and Deformative Properties of Concrete and Structures with Porous Aggregates of South Ukraine. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Tr. Ch. 2. Tekhnologiya Betona* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Collected Papers. Part 2. Concrete Technology]. Minsk, Minsktiproyekt Publ., 189–207 (in Russian).
 15. Krivitsky M. Ya., Levin N. I., Makarichev V. V. (1972) *Cellular Concrete: Technology, Properties and Structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 136 (in Russian).
- Received: 22.03.2019
Accepted: 29.05.2019
Published online: 31.07.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-303-310>

УДК 691.327/328:621.892

О синергетическом влиянии смазки и химических добавок на получение качественной поверхности бетонных изделий

Докт. техн. наук, доц. П. И. Юхневский¹⁾, инж. Н. П. Димитриадис²⁾

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

²⁾Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье обоснованы научные предпосылки для разработки составов смазочных материалов форм бетонных изделий с качественной поверхностью. Показано, что большое значение имеет учет взаимодействия между пузырьками воздуха, смазкой и жидкой фазой модифицированного бетона. Разделительная смазка должна позволять воздуху мигрировать в определенной степени и выходить из поверхности раздела «опалубка – бетонная смесь». Для этого смазка должна обладать невысокой вязкостью, а также придавать максимальную гидрофобизацию форме, обладать минимальной адгезией к бетонной смеси. Добавки гидрофобных веществ в жидкие смазки существенно снижают поверхностную пористость изделий. Химические добавки-пластификаторы, особенно добавки поликарбоксилатного типа, в значительной степени снижают поверхностное натяжение жидкости $\sigma_{гж}$, тем самым существенно уменьшают работу по закреплению воздушного пузырька на поверхности бетона и способствуют его выталкиванию. Кроме того, адсорбированные молекулы химических добавок препятствуют взаимодействию частиц цементного теста с поверхностью формы. Молекулы добавок поликарбоксилатов диффундируют из диффузного слоя бетонной смеси, заполняют капилляры в смазочной пленке, снижают ее вязкость, играют роль присадок, регулирующих процесс растекания смазки и облегчающих удаление пузырьков воздуха в поверхностном слое. Экспериментальные исследования совместного влияния низковязкой смазки на основе растительных масел и модифицирующих добавок подтвердили приведенные выше положения. Наибольшее влияние на снижение поверхностной пористости бетона оказала добавка на поликарбоксилатной основе, причем содержание всех видов пор в бетоне оказалось примерно на одном уровне.

Ключевые слова: разделительные смазки, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания, химические добавки-пластификаторы

Для цитирования: Юхневский, П. И. О синергетическом влиянии смазки и химических добавок на получение качественной поверхности бетонных изделий / П. И. Юхневский, Н. П. Димитриадис // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 303–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-303-310>

About Synergistic Effect of Lubricant and Chemical Additives on Obtaining Quality Surface of Concrete Products

P. I. Yukhnevskiy¹⁾, N. P. Dimitriadis²⁾

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

²⁾Republican Unitary Scientific-Research Enterprise for Construction “Institute BelNIIS” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper substantiates scientific background for development of lubricant compositions used in moulds for concrete products with high-quality surface. It has been shown that consideration of interaction between air bubbles, lubricant and liquid phase of modified concrete is of great importance. A release agent must allow air to migrate to a certain extent and leave “formwork – concrete mix” interface. In this regard the lubricant must have low viscosity. In addition, the lubricant should give maximum hydrophobization to a mould and have minimal adhesion in respect of the concrete mix. Additives of

Адрес для переписки

Юхневский Павел Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-95-87
tbsm@bntu.by

Address for correspondence

Yukhnevskiy Pavel I.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-95-87
tbsm@bntu.by

hydrophobic substances in liquid lubricants significantly reduce surface porosity of products. Chemical plasticizing additives and, in particular, additives of polycarboxylate type substantially reduce surface tension of liquid $\sigma_{\text{гж}}$, thereby they significantly reduce work for fixing an air bubble on concrete surface and contribute to its ejection. In addition, adsorbed molecules of the chemical additives interfere with interaction of cement paste particles and mould surface. Polycarboxylate additive molecules diffuse from a diffuse layer of the concrete mix, fill capillaries in the lubricant film, reduce its viscosity, act as additives that regulate spreading of lubricant and facilitate removal of air bubbles in a surface layer. Experimental studies of the combined effect while using low viscosity grease based on vegetable oils and modifying additives have confirmed the above provisions. The polycarboxylate-based additive has made the greatest impact on reduction of concrete surface porosity and content of all types of pores in the concrete has been approximately at the same level.

Keywords: release lubricants, surface tension, wetting angle, chemical plasticizing additives

For citation: Yukhnevskiy P. I., Dimitriadi N. P. (2019) About Synergistic Effect of Lubricant and Chemical Additives on Obtaining Quality Surface of Concrete Products. *Science and Technique*. 18 (4), 303–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-303-310> (in Russian)

В последние годы большое внимание уделяется вопросам повышения эффективности смазок для форм, используемых при производстве железобетонных изделий. Это объясняется возрастающими требованиями к качеству изделий, к степени их заводской готовности, значительным распространением тонкостенных железобетонных конструкций, изготавливаемых из подвижных пластифицированных бетонных смесей. Еще несколько лет назад процесс нанесения смазки на поверхность форм и опалубки рассматривался в технологии бетонных работ в качестве рядовой операции, а вся функциональность материалов сводилась лишь к созданию барьера между бетоном и формой. Чтобы обеспечить такое разделение, технологи применяли большой расход смазочного материала, жертвуя качеством производимых изделий и конструкций.

В зависимости от состава, физико-химических свойств и по технологическим признакам все смазки для форм железобетонных изделий можно разделить на суспензионные, смазки – замедлители схватывания, гидрофобизирующие и комбинированные. Наибольшее распространение получили гидрофобизирующие смазки. Механизм их действия основан на том, что после нанесения на опалубочной поверхности образуется гидрофобная смазочная пленка, являющаяся барьером против всех видов адгезионного взаимодействия бетона с опалубкой. Изучив многочисленные патентные изыскания в области смазок, мы представили состав типовых смазок в виде схемы, приведенной на рис. 1.

Получение качественной поверхности без дефектов не в малой степени зависит от типа и области применения смазки. Большинство опалубок изготавливают из стали или водостойкой

фанеры, популярность набирает пластиковая опалубка. Эти материалы не впитывают воду, либо имеют минимальное водопоглощение. Использование некачественных смазок может привести к нежелательному окрашиванию бетона, удержанию воздушных пузырьков и прочим негативным последствиям. Как правило, при укладке подвижных смесей воздух выходит по разделу поверхностей опалубки и бетонной смеси. Соответственно смазка должна позволять воздуху мигрировать в определенной степени и выходить из поверхности раздела опалубка – бетонная смесь. Для этого смазка должна обладать невысокой вязкостью. Тип опалубки может диктовать способы предварительной подготовки, выбор типа смазки и способы ее нанесения.

С точки зрения технологических требований важно, чтобы смазка в большей степени смачивала материал формы, а в меньшей – поверхность бетона. Минеральные масла вследствие низкой полярности входящих в их состав углеводородов не обеспечивают образование на поверхностях строительных форм эффективной смазывающей пленки, выдерживающей высокие давления и облегчающей распалубку бетонных изделий. Чтобы управлять процессом растекания смазочных материалов, изменяют критическое поверхностное натяжение, вводя добавки или регулируя технологию приготовления смазки. Степень смачивания количественно характеризуют краевым углом смачивания [1] (рис. 2), т. е. угол между касательной к поверхности жидкость – газ и твердой поверхностью с точкой контакта трех фаз и измеряемый всегда внутри жидкой фазы.

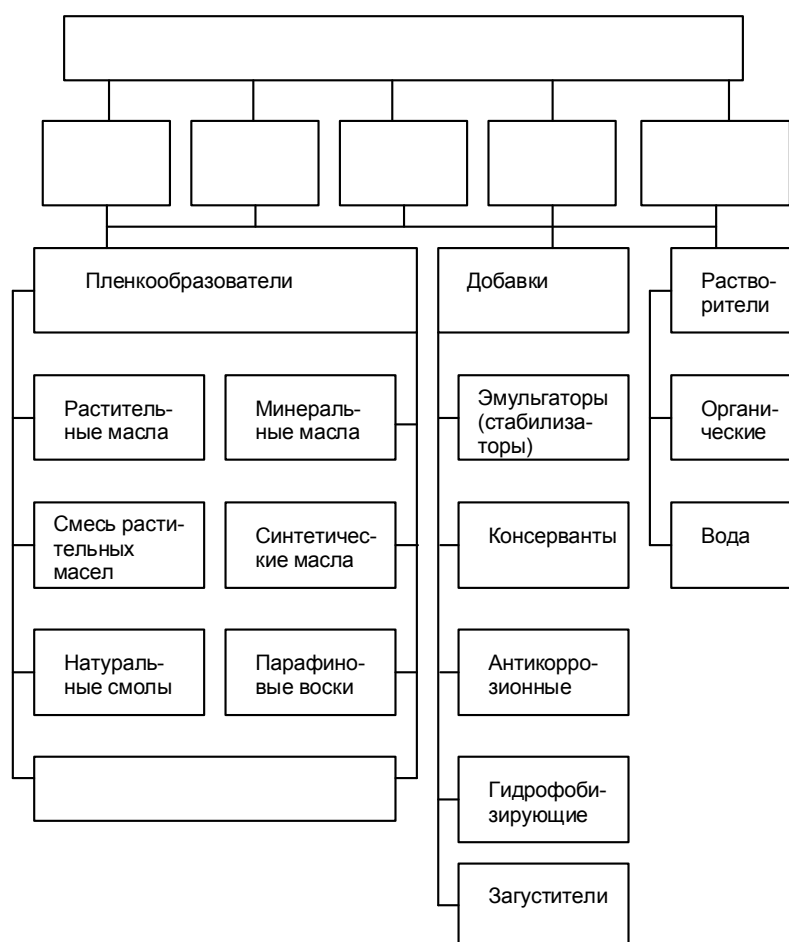


Рис. 1. Структура гидрофобизирующих смазок для форм

Fig. 1. Structure of hydrophobic lubricants for moulds

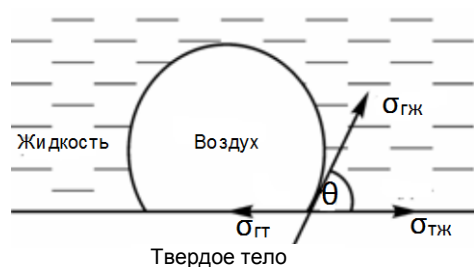


Рис. 2. Краевой угол на границе раздела «твердое тело – жидкость – воздух»

Fig. 2. Contact angle at "solid – liquid – air interface"

Краевой угол смачивания в равновесных условиях определяется соотношением значений свободной поверхностной энергии (или поверхностного натяжения) трех соприкасающихся фаз:

$$\sigma_{ГТ} - \sigma_{ТЖ} = \sigma_{ГЖ} \cos \theta \quad (1)$$

или

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{ГТ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ГЖ}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{ГТ}$, $\sigma_{ТЖ}$, $\sigma_{ГЖ}$ – поверхностное натяжение на границе «газ – твердое тело», «твердое тело – жидкость», «газ – жидкость» соответственно, мДж/м²; θ – краевой угол смачивания.

Связь между работой адгезии и краевым углом смачивания характеризуется уравнением Дюпре – Юнга [1]

$$W_a = \sigma_{ГЖ} (1 + \cos \theta). \quad (3)$$

Если смазка плохо смачивает бетон (бетонную смесь), то $\theta \rightarrow 90^\circ$ и работа адгезии будет минимальной.

Закрепление пузырька газа на твердой поверхности – самопроизвольный процесс, который, согласно второму закону термодина-

мики, может протекать лишь с уменьшением свободной энергии системы. Убыль свободной поверхностной энергии ΔF системы после прилипания пузырька к поверхности, отнесенная к единице вновь образованной поверхности раздела «частица – газ», можно выразить следующим уравнением [1]:

$$\Delta F = \sigma_{гж} \frac{1 - \cos \theta}{2}. \quad (4)$$

Формула (4) соответствует работе, затраченной на образование единицы площади контакта «твердое тело – газ», когда эта площадь не ограничена гранями частицы, т. е. происходит прикрепление мелкого пузырька к большой поверхности. Закрепление пузырька на поверхности возможно, когда $\Delta F > 0$, т. е. если краевой угол смачивания $\theta > 0$.

Значения поверхностного натяжения для углеводородных минеральных масел типа МС-2 $\sigma_{гж} = 25,5\text{--}32,9$ мДж/м², веретенного – 31,8, машинного очищенного – 35,7, синтетических масел – 33–34, воды – 72,8 мДж/м² (или 72,8 Н/м) [2].

Как установлено в [3], металлические и деревянные поверхности лучше смачиваются маслом и хуже – водой; цементный камень в бетоне, наоборот, хорошо смачивается водой и плохо – неполярной жидкостью – минеральным маслом. Поэтому при выборе эмульсионных смазок предпочтение следует отдавать обратным эмульсиям, в которых дисперсионной средой является масло, а фазой – вода и находится внутри неполярной жидкости. Такая смазка создает более прочную пленку и лучше удерживается на вертикальных поверхностях.

Кроме снижения адгезии бетона к металлической форме, смазка должна способствовать получению бетонной поверхности с минимальным количеством пор и раковин. В связи с этим большое значение имеет учет взаимодействия между пузырьками воздуха, смазкой и жидкой фазой модифицированного бетона. При этом состав бетона, режимы уплотнения бетонной смеси в меньшей степени влияют на качество поверхности изделий, чем правильно подобранная смазка.

Существенное влияние на качество поверхности железобетонных изделий оказывают

условия контакта заземленных пузырьков воздуха со смазанными поверхностями формы и с бетонной смесью. Изотропный воздушный пузырек значительно легче закрепляется на поверхности металла, покрытой слоем гидрофобной смазки, чем на гидрофильной поверхности бетонной смеси. Это обуславливается как большей поверхностью контакта пузырька с гидрофобной поверхностью (большой угол смачивания со стороны жидкости – смазки), так и большей скоростью прилипания при прочих равных условиях (вязкость жидкости, давление газа). Внутри пузырька создается избыточное давление, зависящее от поверхностного натяжения воды и размера пузырька, например для шара можно записать

$$P = \frac{2\sigma_{гж}}{R}, \quad (5)$$

где R – радиус кривизны пузырька.

Вероятность коалесценции пузырьков зависит от разности давлений в пузырьках, т. е. от величины

$$\Delta P = 2\sigma_{гж} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (6)$$

Рассмотрим различные случаи закрепления пузырька воздуха между металлом формы и бетонной смесью.

1. Поддоном служит несмазанный участок формы с налипшим слоем бетона (рис. 3а). Пузырек находится в неравновесных условиях. Под действием массы бетонной смеси в процессе уплотнения удастся обычно удалить часть водной прослойки и закрепить пузырек на поверхности, но не очень прочно.

2. Поддон формы покрыт слоем консистентной смазки (солидол, стеарино-вазелиновая смазка) или гидрофобной пластмассы (рис. 3б). Воздушный пузырек мгновенно прилипает к такой поверхности и находится в прослойке воды или цементного молока.

3. Поверхность формы смазана жидкой гидрофобной смазкой (минеральным маслом, рис. 3с). Под действием массы бетонной смеси пузырек раздвигает слой смазки и более прочно закрепляется на поверхности формы.

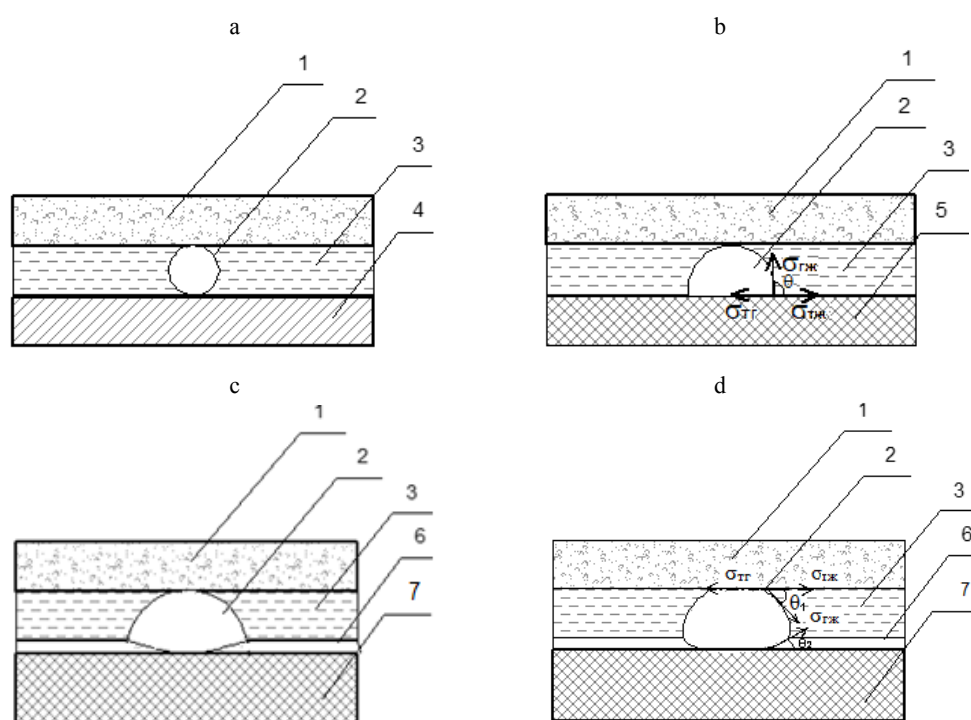


Рис. 3. Схема закрепления воздушного пузырька на бетонной смеси и форме: а, б – на поверхности из гидрофильного и гидрофобного твердого материала соответственно; с – на поверхности металла, покрытого жидкой смазкой; д – то же, при контакте с модифицированной бетонной смесью; 1 – бетонная смесь; 2 – воздушный пузырек; 3 – прослойка воды (цементного молока); 4 – затвердевший бетон; 5 – гидрофобная пластмасса (консистентная смазка); 6 – слой минерального масла; 7 – стальная форма

Fig. 3. Scheme of fixing air bubble on concrete mix and mould: a, b – on surface of hydrophilic and hydrophobic solid material, respectively; c – on surface of metal coated with liquid lubricant; d – the same when in contact with modified concrete mix; 1 – concrete mix; 2 – air bubble;

3 – layer of water (cement milk); 4 – hardened concrete; 5 – hydrophobic plastic (grease); 6 – mineral oil layer; 7 – steel mould

Таким образом, для максимального закрепления пузырьков воздуха на форме и уменьшения количества раковин на поверхности бетона решающее значение имеет сам факт ее гидрофобности. Одновременно недопустимо оставлять на поверхности формы налипший бетон или наносить смазку неравномерным слоем, оставляя несмазанные участки, так как вследствие плохого прилипания пузырьков воздуха будет ухудшаться качество поверхности изделий.

На прочность прилипания пузырьков воздуха заметное влияние оказывает шероховатость поверхности формы, а именно: на шероховатой поверхности значения краевых углов смачивания, как правило, ниже равновесных [4], а пузырьки отрываются меньших размеров. При вибрации отрыв пузырьков облегчается. При этом, чем выше краевой угол смачивания и площадь прилипания, тем меньше вероят-

ность отрыва его от подложки. Таким образом, смазки должны придавать максимальную гидрофобизацию поверхности формы и обладать минимальной адгезией к бетонной смеси. Добавки гидрофобизирующих веществ в жидкие смазки существенно снижают поверхностную пористость изделий.

В настоящее время основной объем бетонных смесей укладывается с применением пластифицирующих добавок, что несколько изменяет механизм взаимодействия смеси с поверхностью смазки. На практике применяют пластифицирующие добавки двух видов: пластификаторы (суперпластификаторы) и гиперпластификаторы (добавки на поликарбоксилатной основе). Как известно [5], в начальный период взаимодействия минералов цемента с водой молекулы добавок пластификаторов равномерно распределены во всей воде затворения. По мере гидролиза цемента в процессе

хемосорбции молекулы добавки суперпластификатора за счет не связанных с поверхностью ионогенных групп создают вокруг частиц цементного геля структурированный гидратный слой, одновременно вытесняют часть молекул воды из адсорбционного слоя в диффузный, где они удерживаются значительно слабее и располагаются неупорядоченно. При этом низкомолекулярные добавки – олигомеры, как правило, адсорбируются в виде цепи, а в случае высокомолекулярных добавок с привитыми боковыми цепями последние ориентируются перпендикулярно поверхности, выходя за пределы диффузного слоя, препятствуя сближению частиц. При низкой концентрации добавок в диффузном слое преобладает первый способ закрепления, при высокой – второй.

В процессе адсорбции не все функциональные группы добавки связываются поверхностью. Часть активных групп и отдельные сегменты добавки ориентированы в диффузный слой и способствуют формированию его пространственной структуры (добавки-гиперпластификаторы). Боковые цепи и сегменты добавок за счет латеральных взаимодействий гидрофобных радикалов, полярных частей молекулы, за счет сил стерического отталкивания способствуют пластификации цементных композиций.

Таким образом, если при адсорбции суперпластификаторов можно считать не изменяется гидрофильность бетонной смеси, то за счет адсорбции гиперпластификаторов и упорядоченной ориентации углеводородных частей молекулы гидрофильность поверхностного слоя бетонной смеси снижается, что может способствовать закреплению пузырька воздуха (рис. 3d). Одновременно, как показано в [6], поликарбоксилатные пластификаторы уже при концентрации в растворе 0,25 % снижают поверхностное натяжение жидкости $\sigma_{гж}$ на 21–22 %, в то время как обычные пластификаторы – только на 5–6 %. Таким образом, поликарбоксилаты, снижая поверхностное натяжение жидкости, существенно уменьшают работу по закреплению воздушного пузырька на поверхности бетона и способствуют его выталкиванию. Кроме того, адсорбированные молекулы химдобавок препятствуют взаимодей-

ствию частиц цементного теста с поверхностью формы.

В случае вертикальной поверхности (рис. 3d), если углы смачивания θ_1 и $\theta_2 \rightarrow 0$, то согласно формуле (4) и сила закрепления пузырька воздуха на форме или бетоне $\Delta F \rightarrow 0$. При любых углах смачивания выталкиванию пузырька будет способствовать снижение величины $\sigma_{гж}$.

Известно [7], что масляные пленки на металлической поверхности пронизаны сообщающимися капиллярами и обладают высокой влагонепроницаемостью. При хорошем смачивании жидкостью поверхности масляной пленки, когда $\theta \rightarrow 0$ ($\cos\theta \rightarrow 1$), капля не создает напора. В случае плохого смачивания поверхности, когда $\theta \rightarrow 90^\circ$ ($\cos\theta \rightarrow 0$), высота напора, создаваемого каплей, может достигать 79 % от максимальной величины. Под воздействием подкапельного напора возникает зона локальной деформации смазочного покрытия, способствующая увеличению длины и диаметра капилляра. При этом сама капля исполняет роль насоса и резервуара, из которого жидкость и растворенные в ней вещества под давлением нагнетаются в капилляры покрытия.

Молекулы добавок поликарбоксилатов диффундируют из диффузного слоя бетонной смеси, заполняют капилляры в смазочной пленке, снижают ее вязкость, играют роль присадок, регулирующих процесс растекания смазки и облегчающих удаление пузырьков воздуха в поверхностном слое. Согласно [8], присадки должны удовлетворять следующим требованиям: подходить по химическому составу и концентрации, растворяться в базовом масле, адсорбироваться на металле и создавать пленку, снижать поверхностное натяжение базового масла не менее чем на 5 мДж/м², обладать малой летучестью и химической стабильностью на твердом теле. В качестве присадок, в наибольшей степени снижающих вязкость смазочных составов и улучшающих их растекаемость, применяют сложные эфиры жирных кислот. С этой целью в составе смазок используют также поликарбоксилаты [8, 9].

Для проверки вышеприведенных положений авторами проведены опыты по определению влияния химических добавок-пластификаторов бетона на его поверхностную пористость. Для при-

готовления бетонной смеси применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2003 с нормальной густотой 27,5 %, кварцевый песок ($M_k = 2,2$) и гранитный щебень РУПП «Гранит» фракции 5–10, которую перемешивали в бетономешалке принудительного действия. Составы бетонов приведены в табл. 1. Образцы диаметром 100 мм изготавливали по СТБ 1707–2006, а поверхностную пористость определяли в возрасте трех суток нормально-влажностного твердения. Для смазки формы бы-

ла применена ранее разработанная на РУП «Институт БелНИИС» низковязкая смазка на основе отечественных растворителей и масел [10].

Для оценки пористости проводилось фотографирование поверхности образцов с последующей цифровой обработкой и подсчетом количества площадей отдельных раковин. Далее выполнялась сортировка раковин по диаметрам и на основании полученного массива данных строился график поверхностной (интегральной) пористости (рис. 4).

Таблица 1

Составы бетонов для исследования совместного влияния смазки и модифицирующих добавок
Compositions of concrete to study joint effect of lubricant and modifying additives

Номер состава	Расход компонентов смеси, кг				Количество добавки, % от массы цемента, и вид	Осадка конуса, см
	Цемент	Песок	Щебень	Вода		
1	250	850	1060	207	Без добавки	4,5
2	250	850	1060	207	0,45 % Линамикс П120 – полинафталинсульфонаты + лигносульфонаты	19
3	250	850	1060	207	0,5 % Линамикс СП-180 – полинафталинсульфонаты	18
4	250	850	1060	207	0,25 % Реламикс ПК – поликарбоксилаты	18
5	250	850	1060	207	0,05 % ХИДЕТАЛ-П-8 – воздухововлекающая	5
6	250	850	1060	207	0,15 % ХИДЕТАЛ-П-8 – воздухововлекающая	8
7	250	850	1060	207	0,1 % Софэксил-1520А – пеногаситель	5
8	250	850	1060	207	0,2 % Софэксил-1520А – пеногаситель	5

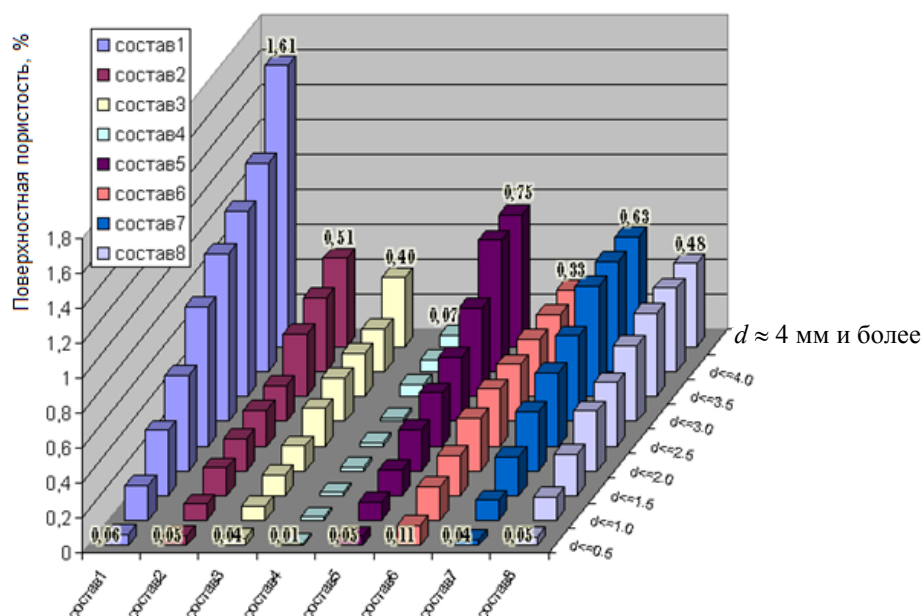


Рис. 4. Совместное влияние добавок в бетон и смазки на поверхностную пористость.

Номера составов и вид добавки соответствуют табл. 1

Fig. 4. Combined effect of additives in concrete and lubricants on surface porosity.

Composition numbers and type of additive correspond to tab. 1

Как видно из рис. 4, введение добавок способствует снижению поверхностной пористости бетона. Воздухововлекающая добавка «ХИ-ДЕТАЛ» на равноподвижной смеси в два раза снизила поверхностную пористость бетона, причем с увеличением количества добавки эффект возрастает. Необходимо отметить, что все добавки, включая пеногаситель, практически не влияют на содержание пор диаметром менее 0,5 мм (микропоры), одновременно снижают объем более крупных пор в бетоне. Наибольшее влияние на снижение пористости оказала добавка на поликарбоксилатной основе (табл. 1, состав 4), при этом содержание всех размеров пор примерно на одном уровне.

Таким образом, для равноподвижных бетонных смесей с добавками-пластификаторами на величину поверхностной пористости влияет химическое строение вводимого в бетонную смесь пластификатора.

ВЫВОДЫ

1. При формировании изделий из модифицированного бетона разделительная смазка для форм должна быть назначена таким образом, чтобы проявился синергетический эффект смазки и добавки-пластификатора в части снижения поверхностной пористости бетона.

2. Выталкиванию пузырьков воздуха на вертикальной поверхности способствует повышение сродства пузырька со смазкой и с бетонной смесью, а в результате – снижение $\sigma_{гж}$ как в отношении смазки, так и цементного молока. Химические добавки для бетона, снижающие поверхностное натяжение на границе «газ – жидкость», способствуют снижению поверхностной пористости бетонных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. М.: Наука, 1985. 398 с.
2. Беренсон, С. П. Химическая технология очистки деталей двигателей внутреннего сгорания / С. П. Беренсон. М.: Транспорт, 1967. 268 с.
3. Довжик, О. И. Эффективные смазки в производстве сборного железобетона / О. И. Довжик, В. Б. Ратинов. М.: Стройиздат, 1966. 138 с.
4. Мацкевич, А. Ф. Смазки и защитные покрытия для опалубки монолитного железобетона / А. Ф. Мацкевич. М.: Стройиздат, 1971. 23 с.
5. Юхневский, П. И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов / П. И. Юхневский. Минск: БНТУ, 2013. 309 с.

6. Морозов, Н. М. Влияние пластифицирующих добавок на свойства песчаных бетонов [Электронный ресурс] / Н. М. Морозов, Н. М. Красникова, С. В. Степанов. http://www.rusnauka.com/15_APSN_2011/Stroitelstvo/3_87805.doc.htm. Дата доступа: 20.12.2018.
7. Князева, Л. Г. Влагопроницаемость пленок масляных покрытий / Л. Г. Князева, А. И. Петрашев // Наука в центральной России. 2013. № 5. С. 59–68.
8. Tabor, D. Silicone Fluids. Their Action as Boundary Lubricants / D. Tabor, W. O. Winer // ASLE Transactions. 1965. Vol. 8, No 1. P. 69–77. <https://doi.org/10.1080/05698196508972080>.
9. Смазочные материалы и проблемы экологии / А. Ю. Евдокимов [и др.]. М.: Нефть и газ РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2000. 424 с.
10. Синтез низковязких разделительных смазок на основе отечественных растворителей и масел с улучшенными органолептическими показателями / Н. Г. Бурсов [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск: Колорград, 2017. С. 32–41.

Поступила 21.01.2019

Подписана в печать 26.03.2019

Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Deryagin B. V., Churaev N. V., Muller V. M. (1985) *Surface Forces*. Moscow, Nauka Publ. 398 (in Russian).
2. Berenson S. P. (1967) *Chemical Technology for Cleaning Parts of Internal Combustion Engine*. Moscow, Transport Publ. 268 (in Russian).
3. Dovzhik O. I., Ratinov V. B. (1966) *Efficient Lubrication in Production of Prefabricated Reinforced Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ. 138 (in Russian).
4. Matskevich A. F. (1971) *Lubrication and Protective Coatings for Formwork of Insitu Reinforced Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ. 23 (in Russian).
5. Yuhnevskiy P. I. (2013) *Influence of Additive Chemical Nature on Concrete Properties*. Minsk, Belarusian National Technical University. 309 (in Russian).
6. Morozov N. M., Krasnikova N. M., Stepanov S. V. (2011) *Influence Agent on Plasticizing Agent on Properties of Sand Concrete*. Available at: http://www.rusnauka.com/15_APSN_2011/Stroitelstvo/3_87805.doc.htm. (Accessed 20 December 2018) (in Russian).
7. Knyazeva L. G., Petrashev A. I. (2013) Moisture Permeability of Oil Coating Films. *Nauka v Tsentralnoy Rossii* [Science in Central Russia], (5), 59–68 (in Russian).
8. Tabor D., Winer W. O. (1965) Silicone Fluids. Their Action as Boundary Lubricants. *ASLE Transactions*, 8 (1), 69–77. <https://doi.org/10.1080/05698196508972080>.
9. Evdokimov A. Yu., Fuks I. G., Shabalina T. N., Bagdasarov L. N. (2000) *Lubrication Materials and Ecological Problems*. Moscow, Neft' i Gaz. Gubkin Russian State Oil and Gas University. 424 (in Russian).
10. Bursov N. G., Dimitriadi N. P., Ivashko L. I., Yuhnevskiy P. I. (2017) Synthesis of Low-Viscosity Parting Lubricants Based on Domestically-Made Solvents and Oils with Improved Organoleptic Characteristics. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Nauch. Tr.* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Kolorgrad Publ., 32–41.

Received: 21.01.2019

Accepted: 26.03.2019

Published online: 31.07.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-311-318>

UDC 725.51

Common Features of Architectural Design of the Medical Purpose Building

I. V. Bulakh¹⁾

¹⁾Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Abstract. The paper considers principal features and specific character of architectural design for health care institutions. Main designing stages, missions and complexities for every successive designing step have been revealed in the paper. The paper presents specific features, main stages and design approaches to designing of modern health care facilities, comfortable architectural environment of health institutions, which have been formed on the basis of the analysis of advanced international experience in the field of designing healthcare facilities. The proposed approaches are based on modern experience in designing medical buildings over the past decade in the developed countries. A special attention has been paid to obsolete methods for architecture-planning organization of healthcare facilities and modern approaches to arrangement of engineering and other systems which significantly influence on economical efficiency, quality, comfort and effectiveness of architectural environment in healthcare institutions. Every healthcare facility, every separate department are considered as unique in their essence, for this reason it is not so easy to reflect modern technological solutions and architectural tendencies. The paper contains an attempt to attract attention of architects to the complexity in designing of a building to be constructed, to find ways which will help to reach its step-by-step solution. It has been noted as well that there is a necessity to arrange interaction between an architect and a medical technologist. Modern medical departments and hospitals have been recently designed and built in the Ukraine, but they are in increasingly short number. These facilities have been constructed due to decision makers who, in spite of diverse difficulties, lack of information and specialists, lack of proper funding, etc., are trying to do their best in order to reach the modern level of designing and construction of hospitals. So-called “typical” medical projects of 70-ies and 80-ies continue to be implemented up to now. This is certainly due to inadequate funding, but such economy has at the end rather high cost.

Keywords: architecture, design, project stages, healthcare institutions, architectural environment of healthcare facilities, network of healthcare institutions

For citation: Bulakh I. V. (2019) Common Features of Architectural Design of the Medical Purpose Building. *Science and Technique*. 18 (4), 311–318. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-311-318>

Общие особенности архитектурного проектирования зданий медицинского назначения

Канд. архит., доц. И. В. Булах¹⁾

¹⁾Киевский национальный университет строительства и архитектуры (Киев, Украина)

Реферат. В статье рассмотрены особенности и специфика архитектурного проектирования учреждений здравоохранения, выявлены основные этапы проектирования, задачи и сложности для каждого последовательного шага проектирования. Освещены особенности, главные этапы и проектные подходы к проектированию современных зданий медицинского назначения и комфортной архитектурной среды медицинских учреждений, сформированные из анализа передового зарубежного опыта проектирования объектов здравоохранения. Предложенные подходы опираются на современный опыт проектирования медицинских зданий, построенных за последнее десятилетие в развитых странах. Особое внимание уделено устаревшим приемам архитектурно-планировочной организации объектов медицинского назначения, а также современным подходам устройства инженерных и других систем, которые существенно

Адрес для переписки

Булах Ирина Валериевна
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
просп. Воздухофлотский, 31,
03037, г. Киев, Украина
Тел.: +38 067 910-36-31
irabulakh81@gmail.com

Address for correspondence

Bulakh Irina V.
Kyiv National University
of Construction and Architecture
31 Povitroflotsky Ave.,
03037, Kyiv, Ukraine
Tel.: +38 067 910-36-31
irabulakh81@gmail.com

влияют на экономичность, качество, комфортность и эффективность архитектурной среды лечебных учреждений. Каждый медицинский объект, каждое специальное отделение уникальны по своей сути, поэтому не очень просто отразить современные технологические решения и архитектурные тенденции. Произведена попытка привлечь внимание архитекторов к сложности составления проектного задания, найти пути его поэтапного решения. Отмечена необходимость взаимодействия между архитектором и медицинским технологом. В последнее время на Украине проектируются и строятся современные отделения и больницы, однако их количество катастрофически мало. Важная заслуга в их появлении принадлежит руководителям, которые, несмотря на разноплановые трудности, недостаток информации и специалистов, отсутствие надлежащего финансирования и т. д., пытаются достичь современного уровня проектирования и строительства больниц. До сих пор продолжают появляться «типовые» медицинские проекты 70–80-х гг. прошлого века. Конечно, во многом это связано с недостаточным финансированием. Но такая экономия, в конечном итоге, обходится очень дорого.

Ключевые слова: архитектура, дизайн, этапы проекта, учреждения здравоохранения, архитектурное пространство медицинских учреждений, сеть зданий здравоохранения

Для цитирования: Булах, И. В. Общие особенности архитектурного проектирования зданий медицинского назначения / И. В. Булах // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 311–318. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-311-318>

Introduction

The current state of healthcare institutions network in Ukraine, its components – medical buildings, unfortunately, is in critical condition now. There are a number of factors, but first and foremost, the majority of medical buildings were erected in the Soviet and even pre-Soviet period of Ukrainian history and is still by the state budget. Inadequate attention and funding, lack of modernization and implementation of energy-efficient achievements have resulted to the fact that since the independence of the Ukrainian state there were global and irreversible processes of outdated medical buildings, their complete inadequacy to the world quality of health-care services [1, 2].

In addition, for the independent period of Ukraine existence, the state institution of architectural designing of healthcare facilities was completely destroyed. And there was no brand new formation of a powerful private sector of the project activity instead of this, which would have had the proper knowledge of the specific sector of the medical building's design. Our country has the imperious want in the revival of quality and present-day sphere of provision of health services. So, it is necessary to start with the study of the latest world architectural and design experience, the project approach analysis, the main stage in the design, aimed at the efficient, economical and progressive design of healthcare facilities. Understanding of foreign experience, best sides adaptation to regional features, and capacity of the Ukrainian state will provide to the renewal of architectural-spatial forms and planning of medical institutions. This, in turn, will have a positive im-

pact on providing the necessity of medical care for the population of both Ukraine and most of the post-Soviet countries [3–5].

Formulation of the problem

The main percentage of medical institutions functioning in Ukraine are in critical or similar condition now, like most CIS countries. The single healthcare facilities built over the last decade in the territories of Ukraine in the largest cities are approaching the lower boundary of modern world standards according to certain criteria. Ukraine has to restore the system of architectural designing of healthcare facilities today, despite the long-term economic, energy and political crisis, the military conflict in the east, rampant corruption [6]. This system should take responsibility for the issue of reorganization of healthcare facilities network, modernization, and enhancement of the energy efficiency of existing health institutions and the design new, modern, comprehensive facilities for the provision of high-quality health services [7].

Research analyzes and publications

Foreign experience of the architecturally-spatial organization of medical institutions is highlighted in the works of many architects: Samimi Kimia, T. M. Creasy, I. M. C. Kras, etc. [8–10]. In particular about contemporary trends in the design of medical institutions is spoken in the work of Giuseppe Pellitteri, Flavia Belvedere, “Characteristics of hospital buildings: changes, processes, and quality” [11]. The impact of color and light in the design of healthcare institutions is explored

in works: Hilary Dalke, Paul J. Littlefair, David L. Read "Lighting and Color for Hospital Design", Faber Birren "Psychological Implications of Color and Illumination", Clark Linda and others [12–15].

The purpose of the article

The purpose of the article is to highlight the common features, the major stages and project approach to the design of modern healthcare facilities, a comfortable architectural space of health institutions, formed from the analysis of advanced foreign experience in the design of healthcare facilities.

The main material

The architectural and urban planning system of health care institutions is an integral to the general system of health protection of any country, which provides protective treatment facilities, diagnosis, care and rehabilitation of the population in a variety of medical institutions. The common features' study of architectural engineering of medical purpose buildings certainly requires a systematic approach to the consideration of the composite blocks of this system. Within the research framework at the urban planning engineering level, architectural and urban planning system of health care institutions is proposed to be considered as a hierarchical structure, which consists of subsystems components: the primary, secondary, tertiary network levels of healthcare provision. Individual groups include medical educational institutions, as well as institutions of the territorial administration of the health care system.

Family doctors' offices (general practitioners), outpatient departments (up to five family doctors' offices, nursing staff, adequate level of diagnostic support), health centers of primary care (up to ten family doctors' offices, nursing staff, high level of diagnostic support) form an urban planning network of primary care facilities of the population. The proposed project-based approach involves a gradual renewal of the traditional for Ukraine, etc. post-Soviet states of polyclinic medical care. The further functioning of the latter, unfortunately, today is an outdated form of many features: the polyclinic buildings were estimated and designed according to the rules of pedestrian accessi-

bility; considerable compaction of urban development and design of predominantly multistoried residential buildings is not taken into account; they fall short of standards the energy-efficient requirements in conditions of energy shortage and require significant financial resources for exploitation and many others. The new proposed project approach is based on the experience of European countries (Germany, France, Great Britain, etc.), helps to bring medical aid closer to the population, reduce the burden on the hospital, ensure gradual provision of medical care, eliminate excess specialization and duplication based on age (children and adults), creating medical care at the family level; regulate the need to create new medical facilities or their premises flexibly.

The following subsystem is an urban planning network of secondary health care facilities that provides for the design and organization of hospital structures. Hospitals offering secondary medical care are divided into five types: multi-field intensive care hospital (provision of twenty-four-hour medical care delivery to patients with acute conditions requiring high intensity of treatment and care); hospital for scheduled treatment of chronic patients (repeated courses of therapy or treatment using standard therapeutic regimens, without the need for intensive care and equipment for the treatment procedure); rehabilitation hospital (restoration of functions after diseases or injuries, to prevent disability and / or rehabilitation of invalids requiring special equipment); hospices (provision of palliative care and psychological support to final patients who need special equipment to provide such care and treatment, as well as specially trained, mainly nursing staff, and wide involvement of volunteers); hospital for medical and social assistance (care and provision of social and palliative care to chronic patients with minimal provision of diagnostic and medical equipment, middle medical personnel and social workers). For eliminating multiple duplication of medical institutions in one territory (departmental, district, city, regional, children's, adults, etc.), a network of secondary medical care hospitals is proposed to be formed by universal, without specialization, for signs. The calculation of the location of each type of hospital is carried out individually, it is recommended to set the following limits: the population maintenance is 150–200 thousand people, the service radius is 60–90 km.

The subsystem of tertiary level of medical care is proposed to be formed by highly specialized hospitals (territorial and nationwide), including children's hospitals, highly specialized dispensaries and medical diagnostic centers, which provide treatment for complicated, rare or expensive cases. These institutions should be distinguished by considerably better material and technical support, structure complexity and functions, as well as the radius and number of population services – about 1 million persons unlimited territorial. The main functions of the urban planning network of TMD institutions include: provision of highly skilled, specialized and unique medical care to patients; formation of research and clinical centers of innovative development of national science, education and production. The priority task is creation of university clinics that combine medical, educational and research processes. Every of the listed city-planning networks of health facilities, each separate healthcare facility is a complex “organism”, which is closely intertwined with special requirements for the technology of medical processes, architectural and space planning, space planning decision, resistance to rapid changes in the medical equipment sphere, and as a consequence, there are changing requirements to the premises of medical buildings, their “flexibility”.

Today healthcare facilities design is very specific and isolated architectural activity field that grows at a rapid pace. And it's not every architectural design organization is able to carry out a project of a medical object that would correspond to the latest trends in world construction and design of this segment of buildings. Today in most leading European countries and in the United States, there is no typical approach to the design of healthcare institutions and there are separate architectural offices specializing in the implementation of health facilities projects. Thus it is necessary to identify a number of major stages, describing the model of the “ideal” process of designing a healthcare facility. And provided their consistent observance, there are conditions that ultimately make it possible to obtain an architectural and project design that meets all modern world requirements for the design of healthcare facilities [16].

The first stage of design (pre-design concept) implies that on the basis of a medical task and a business plan a plan-program task is prepared,

which accurately specifies the useful areas of all medical and auxiliary units are determined the number of serviced population and territorial boundaries. At this stage, the estimated number of floors of the building, building boundaries, configuration, shapes, etc. are determined. It is necessary to determine with the offices' location, entrances, access ways, elevators, and stairs with sufficient accuracy. At the end of the first stage of design, it is possible to calculate the approximate amount of engineering resources that will ensure the functioning of the healthcare institution. This first part of the project work becomes basic and requires a very accurate elaboration of both the medical problem and the responsible work of the architect. Unfortunately, in practice, quite often, determining the areas of the future healthcare facility and its preliminary functional zoning relates solely to doctors who are guided by their own experience and certainly do not possess the necessary architectural knowledge, which is essential at the initial stage of design. In addition, specific knowledge is required about modern technologies (medical, engineering, etc.) that can significantly influence and correct the required estimated area of individual functional areas of the medical building.

The issue of normative documents on the design of health facilities is required for the particular attention. The task of design is made by professionals who are forced to focus on existing rules and regulations, which are largely past practices. In Ukraine, for a long time the design of new and reconstruction of existing buildings and structures of all types of medical facilities, regardless of their subordination and form of ownership, was standardized by the requirements of DBN, V.2.2-10–2001 “Buildings, and structures, healthcare institutions with changes and additions”. In 2018, the new state normative document DBN V.2.2-10:2017 “Buildings and facilities, health care institutions” came into force. At this first stage of the design of healthcare facility, unfortunately, as a rule, is not enough attention, time and money, at best, such pre-design developments are part of the works on the stage of the “Project” and architectural companies are forced to perform them only after the successful bid. As a result, the architect and medical technologist cannot match into the volume of the healthcare facility, which is calculated in knock out way. The further conse-

quences of this approach are clear. Much more often this stage can be performed when working with private structures [17].

An even drearier situation occurs during the reconstruction of healthcare buildings and during the renovation (adaptation) of non-medical buildings. In the latter case, we are talking about the architectural design of private medical projects. At first, the home is selected and bought, and only then is the question of writing a plan-program task or even proceeding with the reconstruction of the building without it. In addition to the areas under reconstruction, the possibility of obtaining enough electricity, supplying communications to this building is playing an important role. Only after the completion of the task, which contains data on the basic medical and technological equipment, is possible to calculate the aggregated engineering load. As a result, the previous concept and perspectives of the organization of the medical environment are undergone significant changes, which is also accompanied by a pre-investment of considerable financial costs and time, and ultimately can lead to the rejection of the planned project. At purpose-designed architectural offices in European countries and in the United States simultaneously work with specialists in both medical and architectural education, which allows together with the investor and doctors to create modern and rational architectural projects them from the very beginning, the implementation of which in the future does not lead to an increase in the implementation time and increase in value. In large leading specialized architectural organizations, mastery of designers is practiced by two diplomas (architectural and medical higher education) [18].

The second stage of the design of a healthcare facility begins after the approval of pre-project proposals and involves directly architectural design work. An interesting feature of the European project approach is that there is no clear distribution of the "Project" and "Detailed Documentation" stages. At this stage, the presiding architectural company receives and performs the function of general design contractor, performing all space planning decisions. The very important aspect of the project work at this stage is the joint work of an architect and medical technologist. Even an experienced architect is not able to design a medical facility as the only powerful mechanism without the introduc-

tion of all modern medical technologies that grow at very fast pace, cannot separate the flows of patients, materials, etc. It is possible to run the architectural design of a healthcare institution without fail only by being constantly aware of the medical world events, knowing the new equipment, new principles for the separation of streams, etc. [19].

It is important to dwell on the peculiarities of the planning decisions of healthcare institutions which are outdated and not relevant. The corridor-type arrangement was adopted in the middle of the last century no longer correspond to contemporary design requirements. Its appearance is associated with many factors – the lack of modern construction technologies, reliable means of vertical communications (elevators) and, of course, a lower level of "technology" in the patients' treatment. It is impossible today, for example, to put a modern surgery block, an intensive therapy unit, and others in most of the existing healthcare facilities in Ukraine. Requirements for people streaming, air purity, etc. have changed very considerably that a fundamentally different building configuration is required now. In cases of long corridors, it is impossible to provide the "flexibility" that is needed in modern clinics and hospitals, the ways of medical personnel movement in the bed wards, diagnostic rooms, surgery blocks etc. are considerably lengthened. Also, in that case of long corridors are requires more maintenance (heating or cooling space, electricity costs). But the most important point is that the optimal flow distribution is possible only with a certain building configuration. Modern healthcare centers architecture, which at planning the factor updating the technological requirements has taken into account in advance, differs significantly from the usual rectangular elongated healthcare institution shape. The convenience of medical staff with a reduction in time spent on moving to a healthcare institution is paid a great attention to contemporary architectural projects. The movement routes of medical staff and patients with visitors are separated inside the modern ward office which is also possible only with a certain configuration of the building. The optimal building configuration essentially depends on the purpose of the facility. The greater the building saturation with modern diagnostic equipment, the more specialized offices in it, the surgery blocks, that needs a more complex configuration for the

optimal functioning of all services and the provision of communications between departments [20–24].

The proposed project based approach to the design of primary health care institutions offered in this article allows dispose flexibly of the smallest project units (family doctors' offices) in new buildings, in particular, in the built-in-type form on the first floors of multi-storey residential and public complexes that have become an integral part of the modern urban environment most of the major cities of Ukraine. The design and dispose of outpatient facilities should be provided at the level of the microdistrict, and the primary medical care center with more powerful diagnostic equipment at the residential area level.

Practiced widely architectural projects of hospitals and healthcare facilities are often performed by foreign design companies, but it should be noted that in this case, the project company should work in strong collaborative relationship with national medical technologists and architects. Codes of the structural design of healthcare institutions, adopted in other countries, are quite different from Ukrainian and the adaptation of foreign projects to Ukrainian regulations is rather complicated and hard work. This also applies to space planning decision, preparation and legalization of project documentation, medical facility inspection for the possibility of its application in Ukraine. This way will significantly increase the cost of the project and extend a deadline the design time, but today such tactics are possible and sometimes necessary, as in our country there are very few specialized companies capable of independently, without the involvement of foreign specialists, to execute the project qualitatively [25].

World experience in the design of medical facilities indicates an increase in attention to engineering communications and in modern clinics the cost of engineering systems is 40–45 % of the total cost of construction of the facility. This is due to different circumstances: firstly, these are new requirements for ventilation and air purity in healthcare institutions. Secondly, it is necessary to provide for the possibility of upgrading or even increasing the amount of engineering equipment. For this purpose, the most appropriate is modern technology for laying engineering communications between floors. The height of such a technical floor is up to 2 m. This allows to install not only

a much larger number of air ducts, electric cables, low-current systems, etc., but also has free access to all engineering communications and, if necessary, to improve them. At the same time, an important factor is that such a scheme allows planning more rational, applying an “individual” approach to the planning of each floor due to much fewer restrictions that arise with the only vertical arrangement of communications (lack of engineering mines) [26].

Another important. Medical technology develops at a very fast pace and requires appropriate engineering modernization, and the cost of major repairs and building adaptation to new technologies and tasks, with the traditional location of communications, is far more extensive. Also, an increase in the volume of construction does not lead to a proportional increase in its value. The design, construction, and laying of communications in such buildings with technical floors are much faster than usual, which significantly reduces the cost, especially if we aspect of modern engineering design of healthcare facilities is the economic component of such projects. If you consider a health facility as a long-term project, then, of course, this approach is more beneficial for many economic reasons. First of all engineering networks maintenance is carried out with much fewer expensestake into account inflation and wage costs.

The architect pays much more attention to the internal planning of space when designing. It should not be forgotten that more rational use of the area allows, in general, to reduce the total floor area in comparison with traditional planning. These reasons allow a number of Western architects even to talk about roughly the same total cost of medical institutions under the traditional and above-mentioned approaches. Such ideas have long been reflected in the surgery blocks design and construction when all engineering communications are located in built-up panel space. Increasingly important role in the design of healthcare centers is played by the requirements imposed on the comfort of both medical staff and patients. Modern medical institutions have largely resembled other public buildings in terms of comfort. It is well known that the psychological component plays an important role in finding a patient in a clinic. The creation of “home” or “hotel” space in

the offices and bed wards is extremely important now, as well as giving priority to the creation of single and double chambers.

Time-saving, taking care of more efficient use of it, led to the emergence of a pneumatic tube system connecting the pharmacy, laboratory, etc. in which the medicines and materials for analyzes in containers from the appropriate services to the department are transmitted through. The development of information technology, the emergence of the possibility in rapid information exchange, clinical data, both inside the hospital and between health institutions dictate the need to create in any clinically significant in both the saturation and occupied areas of information and computer department. Designing a healthcare facility is necessary to take into account its possible expansion as a result of the emergence of new diagnostic and therapeutic methods, as well as due to the growth and aging of the population. It is necessary for architectural decisions to take into account the profile of the healthcare center, its throughput, even the location. It is impossible to solve these or other tasks by direct increase of the area.

It is necessary to follow all the normative documents working with foreign companies or executing the project on their own. And as noted above, they are not exactly complete; some of them have been taken a long time ago and do not take into account the rapid development of modern technology. Sometimes the established norms are somewhat different from each other in different documents. This also applies to the offices' placement, bed wards, services and the spatial requirements. Moreover, it can be seen as clearly insufficient areas, registered as normative for the placement of some units, and clearly overestimated. For example, the area of the modern sterilization center is almost always more than prescribed in the norms, and laundry, disinfection department require much smaller areas [27]. In cases where it can not be proved that, for example, when installing modern equipment or the location of certain offices inside the premises (without natural light), it is possible to significantly reduce the area of some departments, as a result, the overall size of the medical building will be significantly increased. At the same time, there is no noticeable improvement in its functioning, and the cost of the project increases.

CONCLUSIONS

1. In the conditions of reforming the health care system of Ukraine, the possibility of implementing more qualitative and effective architectural and urban approach to the organization of medical institutions, corresponding to proven progressive world experience. Changes are needed from the construction of a modern hierarchical architectural and urban planning system of health care institutions. To consider the hierarchical architectural and urban development system of health care institutions as a gradual subordination of networks of primary, secondary and tertiary medical care of the population is proposed from this position in the article. The first part of the system is the primary system of urban health care should be as close as possible to the population and cover up to 80 % of the prevention and treatment services of all age groups within the framework of family health care, which allows replacing the traditional hospital treatment approach and significantly reducing the burden to the hospital sector and accordingly to save financial resources. The existing hospital network in Ukraine needs, of course, a major cardinal renovation, which today is characterized as an overly specialized, repeatedly duplicating, ineffective and outdated structure with excessive number of hospital beds. From this position, it is advisable to organize a urban planning network of secondary medical care which includes five types of universal (on an age basis) intensive, rehabilitation, chronic, palliative and social medical services, as well as a tertiary health care network with highly specialized and unique hospitals. The number and location of hospitals should be individually determined for each individual region (hospital district), taking into account specific conditions (population, demographic projections, morbidity, natural and climatic conditions, topographic features and the state of the transport infrastructure, requirements and expectations of the society, etc. regional factors).

2. Typical for the Soviet period, a typical industrial approach to the design and disposal of health facilities in a number of economic, political, demographic, and urban factors, unfortunately, today can not meet the needs of society and does not match the capabilities of the state. Every healthcare facility, even every separate branch, is unique in its essence and within the article, it is impossible to reflect even a small part of modern

technological decisions, architectural tendencies. In this article was made an attempt to draw the attention of architects to the complexity of the project, to find out ways to a step-by-step solution and to note the need for interaction between the government, community, investor, architect and the medical technologist. Modern departments and hospitals are being designed and built in Ukraine recently, but their number is disastrously low. The main credit in their appearance belongs to facility administrators who, in spite of diverse difficulties, lack of information and specialists, lack of proper funding, etc., are trying to modernize the healthcare facilities design and construction. "Typical" projects 70–80-is of the last century still continue to appear. Surely, this is largely due to inadequate funding, but this cost is ultimately very expensive.

REFERENCES

1. Bulakh I. V. (2017) Problematic Area of Assignments for Reorganization of Children's Medical Institution Network in the Ukraine. *Mistobuduvannya ta Teritorialne Planuvannya* [Urban Development and Territorial Planning]. Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture, (63), 45–51 (in Ukrainian).
2. Bulakh I. V. (2017) Prerequisites for Reorganization of Children's Medical Institution Network in the Ukraine. *Suchasni Problemi Arkhitekturi ta Mistobuduvannya* [Modern Problems of Architecture and Urban Development]. Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture, (47), 444–450 (in Ukrainian).
3. Tanner M. (2008) The Grass is Not Always Greener: a Look at National Health Care Systems Around the World. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1262978>.
4. Bulakh I. (2018) The Main Trends in Organization of Architectural Environment of Medical Institutions. *Web of Scholar*, 1 (5(23)), 59–62.
5. Bulakh I. V. (2016) Landscape and Water as a Basis of Modern World Tendencies in Designing of Medical Institutions. *Suchasni Problemi Arkhitekturi ta Mistobuduvannya* [Modern Problems of Architecture and Urban Development]. Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture, (46), 392–396 (in Ukrainian).
6. Bulakh I. V. (2018) Reconditioning and Relaxation Center for Combatants. *Problemy Teorii i Istorii Arkhitektury Ukrainy: Sb. Nauch. Tr.* [Problems of Architecture Theory and History of Ukraine. Colltion of Scientific Works]. Odessa, (18), 207–213 (in Ukrainian).
7. Bulakh I. V. (2018) Architecture-Urban Development Network of Medical Facilities in Kyiv. *Internauka*, 14 (54), 11–13 (in Ukrainian).
8. Kimia Samimi (2012) *Children's Cancer and Transplant Hospital. Master's Thesis*. University of Massachusetts.
9. Creasy T. M. (2012) *The Wellness Clinic, a New Approach to Healthcare Design. Master's Thesis*. University of Tennessee.
10. Kras I. M. C. (2011) *Sustainable Hospital Buildings. Master's Thesis*. Technical University of Delft.
11. Giuseppe Pellitteri, Flavia Belvedere (2010) Characteristics of the Hospital Buildings, Changes, Processes and Quality. *ARCC/EAAE 2010 International Conference on Architectural Research*. Available at: https://www.brikbase.org/sites/default/files/E062_Pellitteri.pdf.
12. Faber Birren (2016) *Color Psychology and Color Therapy, a Factual Study of the Influence of Color on Human Life*. Hauraki Publishing. 227.
13. Clark Linda (1975) *The Ancient Art of Color Therapy, Updated, Including Gem Therapy, Auras and Amulets*. Devin-Adair Publ. 145.
14. Ruth Brent Tofle, Benyamin Schwarz, So-Yeon Yoon, Andrea Max-Royale (2004) *Color in Healthcare Environments: A Critical Review of the Research Literature*. A Research Report. Available at: https://www.healthdesign.org/system/files/color_in_hc_environ_0.pdf.
15. Hilary Dalke, Paul J. Littlefair, David L. Loe (2004) *Lighting and Colour for Hospital Design*. London South Bank University.
16. Bulakh I. V. (2018) Modern International Experience on Designing Energy Efficient Hospitals (Singapore Experience). *Suchasni Problemi Arkhitekturi ta Mistobuduvannya* [Modern Problems of Architecture and Urban Development], Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture, (50), 332–440 (in Ukrainian).
17. Hans Nickl, Christine Nicki-Weller (2007) *Hospital Architecture*. Einbeck: Verlagshaus Braun. 352.
18. Christoph Schirmer, Philipp Meuser (2006) *New Hospital Building in Germany: General Hospitals and Health Centres*. Germany, Dom. 307.
19. Christoph Schirmer (2006) *Hospital Architecture: Specialist Clinics & Medical Departments*. Singapore, Page One Publ. 304.
20. Timothy, Michael Creasy (2012) *The Wellness Clinic: a New Approach to Healthcare Design*. Knoxville: University of Tennessee.
21. Isabelle Kras (2011) *Sustainable Hospital Buildings*. Delft: Technical University of Delft. Available at: https://www.brikbase.org/sites/default/files/Sustainable_hospital_buildings.pdf.
22. Evans M. R., Henderson D. K. (2005) Infection Control in the Healthcare Industry in the XXI Century. *Hospital Engineering & Facilities Management*, (2), 58–62.
23. Perlman C. (2005) Are Hospitals Getting Left Behind. *Cleanroom Technology*, 17.
24. Streifel A. (2005) Control Factors in Hospital Building Maintenance and Operations. *Hospital Engineering & Facilities Management*, (1), 55–58.
25. Wierzbicka A., Pedersen E., Persson R., Nordquist B., Ståle K., Gao C., Harderup L.-E., Borell J., Caltenco H., Ness B., Stroh E., Li Y., Dahlblom M., Lundgren-Kownacki K., Isaxon C., Gudmundsson A., Wargocki P. (2018) Healthy Indoor Environments: the Need for a Holistic Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (9), 1874. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091874>.
26. Bengochea Escribano M. A., López Jiménez P. A., López Patiño G., Mora Pérez M. (2011) Cuantificación de la Eficiencia de la Fachada Cerámica Ventilada Mediante Técnicas de la Mecánica de Fluidos Computacional. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 50 (2), 99–108. <https://doi.org/10.3989/cyv.142011>.
27. *The Centre for Health Design*. Available at: <https://www.healthdesign.org>.

Received: 15.11.2018

Accepted: 29.01.2019

Published online: 31.07.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329>

УДК 666.9.017:666.97.033.17

Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона

Канд. техн. наук, доц. И. И. Полевода¹⁾, канд. техн. наук С. М. Жамойдик¹⁾,
Д. С. Нехань¹⁾, Д. С. Батан²⁾

¹⁾Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
(Минск, Республика Беларусь),

²⁾ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье приведены результаты комплекса лабораторных и теоретических исследований физико-механических свойств центрифугированного бетона на образцах секторального сечения, выпиленных послойно из готового изделия. В качестве готового изделия использована стойка из бетона класса по прочности на сжатие В40, изготовленная методом центрифугирования на машине РТЦ-5. Проведена оценка неоднородности по толщине сечения путем визуального определения изменения состава по сечению, определения прочности, плотности полученных бетонных образцов, содержания воды по сечению бетонной смеси. По результатам визуального изучения состава бетонной конструкции выявлено, что 1/8 часть конструкции (от внутренней поверхности) не имеет крупного заполнителя. В дальнейшем по мере движения к периферии наблюдается увеличение крупного заполнителя и уменьшение размера и числа ячеек между зернами щебня. Анализ опытных данных показал, что свойства центрифугированного бетона в послойно распиленных образцах существенно изменяются: плотность бетона в образцах внутреннего слоя меньше на 8 %, чем в образцах наружного слоя, а прочность бетона на сжатие – на 34 %, водосодержание бетонной смеси образцов внутреннего слоя оказалось больше на 43 %, чем в образцах наружного слоя. Построены аппроксимирующие кривые, показывающие закономерности изменения плотности, прочности бетона, водосодержания бетонной смеси по толщине. Получены линейные и экспоненциальные уравнения, описывающие изменение физико-механических свойств центрифугированного бетона по сечению в зависимости от свойств конструкции в целом, которые с учетом вычисленных поправочных коэффициентов k_1 и k_2 могут быть использованы с приемлемым уровнем достоверности в практических расчетах центрифугированных бетонных конструкций. Выявлена связь изменяющейся по сечению прочности центрифугированного бетона с действием центробежной силы инерции. Выведено уравнение, связывающее прочность центрифугированного бетона с его плотностью. Анализ результатов исследований позволяет утверждать, что в центрифугированных бетонных конструкциях основным источником восприятия нагрузок являются наружные слои.

Ключевые слова: прочность, плотность, истинная плотность, водосодержание, неоднородность, относительная толщина, образцы секторального сечения, метод центрифугирования, прогрессивные технологии, раствор, цементный камень, центробежная сила, кольцевое сечение, метод наименьших квадратов, бетонная смесь

Для цитирования: Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона / И. И. Полевода [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 319–329. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329>

Study of Physical and Mechanical Properties of Centrifuged Concrete

I. I. Palevoda¹⁾, S. M. Zhamoidzik¹⁾, D. S. Nekhan¹⁾, D. S. Batan²⁾

¹⁾University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus),

²⁾JSC “Svetlogorsk Reinforced Concrete Products and Structures Plant” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents a complex of laboratory and theoretical studies of physical and mechanical properties in centrifuged concrete while using samples of sectoral cross-section which are cut in layers from a finished product. A post made

Адрес для переписки

Нехань Денис Сергеевич
Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 33 674-45-78
denis_nechany@mail.ru

Address for correspondence

Nekhan Dzianis S.
University of Civil Protection of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic of Belarus
25 Mashinostroiteley str.,
220118, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 33 674-45-78
denis_nechany@mail.ru

of concrete having B40 grade for compression strength and manufactured while using centrifugation with the help of PTЦ-5 machine. Assessment of heterogeneity across section thickness has been carried out by visual determination of composition changes in cross section, determination of strength, density of the obtained concrete samples, and water content over cross section of concrete mix. According to the results of a visual study on composition of a concrete structure it has been revealed that 1/8 part of the structure (from an inner surface) does not have a large aggregate. Later, as it moves to periphery, there is an increase in coarse aggregate and a decrease in size and number of cells between grains of gravel. An analysis of experimental data has shown that properties of the centrifuged concrete in samples being sawn in layers change significantly: density of concrete in samples of an inner layer is lower by 8 % than in samples of an outer layer, and compressive strength of concrete – by 34 %, water content of concrete mixture of samples of the inner layer has turned out to be by 43 % higher than in samples of the outer layer. Approximating curves showing regularities of changes in density, concrete strength, water content of concrete mixture over thickness have been constructed in the paper. Linear and exponential equations have been obtained that describe changes in physical and mechanical properties of centrifuged concrete over section depending on structure properties as a whole, which, taking into account the obtained correction factors k_1 and k_2 , can be used with an acceptable level of confidence in practical calculations of centrifuged concrete structures. Relationship between strength of centrifuged concrete varying over cross section and action of a centrifugal force of inertia has been revealed in the paper. An equation has been obtained that relates the strength of centrifuged concrete to its density. Analysis of the research results makes it possible to assert that the main source of loading perception in centrifuged concrete structures is outer layers.

Keywords: strength, density, true density, water content, heterogeneity, relative thickness, samples of sectoral section, centrifugation method, progressive technologies, mortar, cement stone, centrifugal force, annular cross section, least squares method, concrete mixture

For citation: Palevoda I. I., Zhamoidzik S. M., Nekhan D. S., Batan D. S. (2019) Study of Physical and Mechanical Properties of Centrifuged Concrete. *Science and Technique*. 18 (4), 319-329. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-319-329> (in Russian)

Введение

Бетон вносит существенный, если не решающий, вклад в создание материальной основы среды обитания современной цивилизации. Преимущества бетона перед другими материалами способствовали быстрому и широкому его применению в мировой строительной практике еще до того, как надлежащим образом были изучены его важнейшие технологические особенности и технические качества [1].

За последние 20 лет железобетон и бетон уверенно расширяют области своего применения в строительстве, вытесняя другие строительные материалы [2]. Немаловажная роль здесь отводится науке, которая должна уделять особое внимание совершенствованию производства железобетона (бетона), в частности созданию прогрессивных технологий, которые давали бы экономический эффект. К одной из таких технологий относится метод центрифугирования, позволяющий уменьшить расход бетона до 50 % без снижения прочности центрифугированного бетона по отношению к способу изготовления путем вибрирования [3, 4]. Замена традиционных металлических изделий железобетонными позволяет экономить материальные средства. Так, при производстве железобетонных напорных труб расход чугуна и стали уменьшается на 90 %, снижается стоимость прокладки трубопроводов, сводятся к

минимуму эксплуатационные затраты и повышается долговечность конструкций [5].

Из центрифугированного бетона изготавлиются [1–8]:

- напорные и безнапорные трубы;
- опоры линий электропередачи, связи и освещения;
- колонны, свайные основания, стойки кольцевого сечения;
- железобетонные конструкции туннельных сооружений метрополитена;
- изделия и конструкции квадратного сечения (балки, ригели, декоративные формы).

Центрифугированный метод изготовления бетона подразумевает вращение формы, в которую забрасывается бетонная смесь. Распределение и уплотнение бетонной смеси в процессе центрифугирования происходят под действием центробежной силы, возникающей при вращении формы. При этом под действием центробежного прессирующего давления происходит отжатие свободной воды с взвешенными в ней высокодисперсными фракциями из структурных ячеек цементного теста [1], что ведет к повышению плотности и прочности бетона.

Величина центробежных сил пропорциональна массе частиц бетонной смеси. Следовательно, частицы заполнителя, как наиболее тяжелый компонент смеси, стремятся расположиться ближе к стенкам формы, а свободная

вода, как более легкий компонент, отжимается внутрь. В зависимости от величины центробежных сил, продолжительности уплотнения и водоудерживающей способности смеси в процессе изготовления может отжиматься до 20–30 % воды, содержащейся в бетоне, что непременно вызывает повышение класса бетона [1, 5, 6].

Исследования центрифугированного бетона показывают, что его свойства по сечению изменяются [1, 5, 9] в широких пределах. Это объясняется структурной неоднородностью цементного камня и распределением зерен заполнителя по толщине сечения. Так, в [9] по высоте наблюдается изменение средней плотности бетона (до 4 %), общая пористость в шламовом слое увеличивается почти на 18 %, а прочность бетона уменьшается на 18–25 %. Следует отметить, что данные исследования проводились в лабораторных условиях путем послыйного распиливания цилиндров диаметром 6,5 см и высотой 8,0 см. Поэтому распространение результатов исследований на реальные конструкции не в полной мере приемлемо ввиду отсутствия непосредственно самого технологического процесса. Ко всему прочему, режим для изготовления образцов принят аналогичный изготовлению опор ЛЭП, однако области применения центрифугированного бетона гораздо шире.

Выводы [9] свидетельствуют о том, что отношение прочности центрифугированного бетона на внутренней поверхности к средней по толщине изменяется в пределах 0,87–0,94. В. Л. Щуцким, Д. А. Дедуком, М. Ю. Гриценко [9] получены различные регрессивные уравнения, описывающие закономерность изменения прочности по толщине, определены эмпирические коэффициенты, позволяющие рассчитать прочностные характеристики такого бетона, из которых следует, что прочность в наружном слое бетона на 20,4 МПа больше, чем во внутреннем, независимо от закладываемого класса прочности, что для практических расчетов не может быть применено. Параболическое уравнение, полученное по результатам исследования, можно распространить сугубо на заложенные в эксперименте параметры.

Следует отметить, что изменяющиеся по высоте характеристики связаны, прежде всего,

с несовершенством технологии производства (неравномерность загрузки формы в процессе изготовления, нарушение технологического процесса и др.), поэтому исследования в этом направлении не проводились.

Анализируя опубликованные в нашей стране и за рубежом исследования неоднородности физико-механических свойств центрифугированного бетона, можно сделать вывод, что их база невелика. Данный факт не может не наталкивать на необходимость проведения подобного рода исследований.

Основная часть

Изготовление конструкции, получение из нее образцов, проведение испытаний осуществлялось в ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» (далее – завод).

Экспериментальная смесь подбиралась в соответствии с «рецептами» лаборатории завода для получения бетона класса В40, которая наиболее широко применяется при изготовлении центрифугированных железобетонных изделий. В экспериментах использовали портландцемент ПЦ500 цементного завода Семех (г. Брест). Ввиду того что широкое применение в Республике Беларусь приобрели песчаник и гранит, в качестве крупного заполнителя брали гранитный щебень РУПП «Гранит». Наибольшая крупность щебня не превышала 20 мм. В качестве мелкого заполнителя использован кварцевый песок с Речного порта г. Бобруйска. Исходная бетонная смесь для изготовления стойки без учета отжатия шлама в процессе изготовления имела следующий состав: портландцемент ПЦ500 – 515 кг/м³; кварцевый песок – 517 кг/м³; гранитный щебень – 1270 кг/м³; вода затворения без примесей – 190 л/м³; суперпластификатор «Полипласт СП-1» – 2,58 кг/м³.

Центрифугирование осуществлялось на центрифуге РТЦ-5 в следующем режиме:

- 1) загрузка бетонной смеси при вращении формы со скоростью 45 об/мин – в течение 1,5 мин;
- 2) распределение бетонной смеси при скорости вращения формы 105 об/мин – 4 мин;
- 3) уплотнение бетонной смеси на скорости 545 об/мин – 16 мин.

При снятии стойки после центрифугирования шлам сливался в емкость, затем замерялись его объем и масса. По результатам измерений вычислялось количество воды и цемента в шламе. Затем по положениям [10] рассчитывали конечный состав бетона: портланд-цемент ПЦ500 – 528 кг/м³; кварцевый песок – 534 кг/м³; гранитный щебень – 1311 кг/м³; вода – 165 л/м³; СП-1 – 2,6 кг/м³. Наружный диаметр полученной стойки (рис. 1) составил 950 мм, толщина – 160 мм. Истинная плотность – 2640 кг/м³ (согласно расчетам).



Рис. 1. Центрифугированная бетонная стойка

Fig. 1. Centrifugal concrete column

При изучении физико-механических свойств по толщине сечения выпиливание осуществлялось послойно [11–13] из элементов кольцевого сечения следующим образом. После распалубки стойка разрезалась пополам. Затем получали полукольца высотой 150 и 100 мм. Из этих фигур выпиливанием были получены полукольца, затем – 1/4 части кольца размерами, приведенными в табл. 1. Все эти части разрезались на образцы секторального сечения шириной по средней линии 100 мм (рис. 2). Данные образцы наиболее адекватно отражают свойства неоднородности центрифугированного бетона [11].

Распиловка стойки и выпиливание образцов из полученных колец осуществлялись алмазными дисковыми пилами (бензопил Stihl TS 420 с алмазным кругом по бетону Wurth, дисковая пила Bosch GWS 22-230 Н с отрезным кругом Yourtools из синтетических алмазов) в соответствии с [14]. Дальнейшую обработку образцов производили при помощи лепестковых кругов. Отклонения от плоскостности опорных поверхностей образцов, прилегающих к плитам пресса при испытаниях на сжатие, не превышали 1 мм. Отклонения от перпендикулярности

смежных граней образцов, предназначенных для испытания на сжатие, не превышали 2 мм. Отклонения средних линейных размеров образцов – не более 4 мм.

Таблица 1

Характеристики полученных 1/4 частей колец
Characteristics of obtained 1/4 ring parts

Расположение	Диаметр, мм			Относительная толщина
	внутренний	наружный	средний	
Внутреннее	630	830	730	0,3125
Среднее	690	890	790	0,5000
Наружное	750	950	850	0,6875
Образец в целом	640	940	790	0,5000

Примечание. Под относительной толщиной понимается отношение расстояния от внутренней поверхности исходного изделия до рассматриваемой точки к толщине конструкции. Относительная толщина образцов определялась как половина отношения разницы между средним диаметром рассматриваемого элемента и внутренним диаметром конструкции в целом к ее толщине.



Рис. 2. Образцы секторального сечения шириной по средней линии и высотой 100 мм (внутреннего, среднего и наружного слоев – сверху вниз)

Fig. 2. Samples of sectoral cross section with width along middle line and height of 100 mm (inner, middle and outer layers – from top to bottom)

На образцы наносилась маркировка с указанием их номера, его принадлежности (внутренний, средний, наружный слои), температуры нагрева, после чего они помещались в камеру нормального твердения до набора 28-дневной прочности.

Затем осуществлялись взвешивание образцов при помощи весов PS 3500/C/2 и PS 10100.R2, определение площади путем обведения образцов карандашом на миллиметровой бумаге с двух сторон, определение высоты путем шестикратного замера высот каждого образца (по три раза с каждой боковой стороны).

Плотность образца ρ , кг/м³, находили по формуле

$$\rho = 10^6 \frac{m}{Sh},$$

где m – масса образца, г; S – среднее значение площади поперечного сечения образца, мм²; h – среднее значение высоты образца, мм.

Затем пять образцов каждого слоя и пять базовых образцов (размерами 150×150×150 мм) подвергались испытанию на прочность на сжатие. В качестве испытательного оборудования использовали пресс Pilot 4 марки 50-C5642. В процессе испытания на прочность на сжатие регистрировалось минимальное усилие, разрушающее образец при его статической нагрузке (рис. 3). Скорость нарастания нагрузки на образец составляла $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с.



Рис. 3. Испытание образцов на прочность

Fig. 3. Testing of sample strength

После испытания образец подвергался визуальному осмотру на предмет определения характера и выявления удовлетворительности разрушения в соответствии с приложением Е [13]. Следует отметить, что все образцы

показали удовлетворительный характер разрушения.

Прочность образца P , МПа, находили по формуле

$$P = 10^3 \alpha_m \frac{F}{S},$$

где α_m – масштабный коэффициент; F – разрушающая нагрузка, кН; S – среднее значение площади поперечного сечения образца, мм².

Положения [10] допускают использование масштабных коэффициентов, закрепленных в [15]. Для перехода от образцов размерами 100×100×100 мм к базовому 150×150×150 мм $\alpha_m = 0,95$. При этом в [10] введен дополнительный коэффициент (равный 1,35) для перехода от прочности образцов секторального сечения размерами $L \times L \times 4L$ к образцам секторального сечения $L \times L \times L$. С учетом некоторого разброса высот в полученных образцах коэффициент α_m будет принимать значения от 0,93 до 0,96. Однако определение α_m в каждом конкретном испытании не оправдано значительным увеличением объемов расчетов. К тому же бетон дает большой разброс прочности, вследствие чего увеличивается погрешность измерений. Прочностные характеристики бетона, полученные при испытаниях в каждой серии, для использования в расчетах подвергаются статистической обработке. Поэтому в качестве переходного коэффициента для образцов размерами 100×100×100 мм $\alpha_m = 0,95$, для образцов размерами 150×150×150 мм $\alpha_m = 1,00$.

Для определения характера изменения по сечению водосодержания бетонной смеси оставшиеся образцы, масса и геометрические параметры которых были предварительно определены, делились на четыре серии. Каждая серия, включающая в себя по пять образцов из каждого слоя конструкции, подвергалась нагреву в камерной печи ПКС-80/12 со скоростью 2 °С/мин до температур 200, 400, 600, 800 °С соответственно с последующей четырехчасовой выдержкой при заданной температуре и дальнейшим охлаждением в лабораторных условиях. Затем образцы повторно взвешивались. Количество удаленной воды (физически и химически связанной) V , л/м³, определялось по следующей формуле:

$$B = 10^6 \frac{m - m_1}{Sh},$$

где m , m_1 – масса образца до и после нагрева, г;
 S – средняя площадь поперечного сечения образца (до нагрева), мм²; h – средняя высота образца (до нагрева), мм.

Результаты эксперимента

Статистическая обработка результатов измерений проводилась в соответствии с [16, 17]. Сравнительные данные по оценке структурной неоднородности центрифугированного бетона приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства центрифугированного бетона

Physical and mechanical properties of centrifuged concrete

Слой	Средняя плотность, кг/м ³	Фактический предел прочности на сжатие, МПа
Внутренний	2370 ± 100	33,6 ± 5,0
Средний	2520 ± 110	41,3 ± 5,8
Наружный	2560 ± 120	45,1 ± 9,1
Образец в целом	2480 ± 20	41,3 ± 5,4
Примечание. Интервал результатов измерений представлен при уровне доверительной вероятности 95 %.		

Опытные графики изменения средней плотности и предела прочности бетона на сжатие по толщине образца приведены на рис. 4, 5.

Количество удаленной воды из образцов (а равно уменьшение массы, отнесенной к первоначальному объему образцов) с ростом температуры приведено в табл. 3.

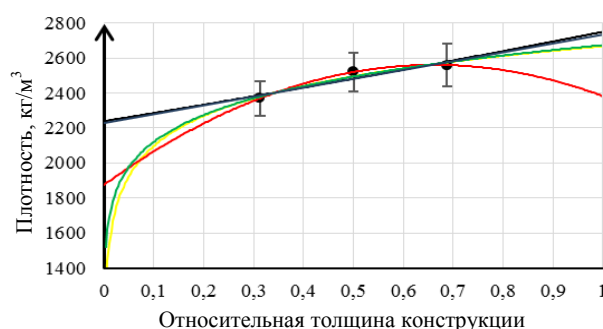


Рис. 4. Изменение плотности бетона по толщине конструкции: черный цвет – экспоненциальная зависимость; синий – линейная (черная и синяя линии практически совпадают); зеленый – степенная; красный – квадратичная; желтый – логарифмическая

Fig. 4. Change in density of concrete through structure thickness: black colour – exponential dependence; blue – linear dependence (black and blue lines almost coincide); green – power dependence; red – quadratic dependence; yellow – logarithmic dependence

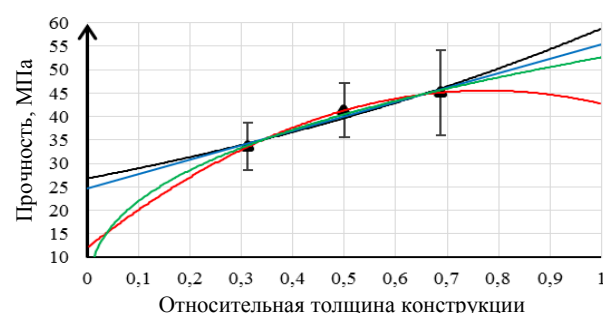


Рис. 5. Изменение прочности бетона по толщине конструкции: черный цвет – экспоненциальная зависимость; синий – линейная; зеленый – степенная; красный – квадратичная

Fig. 5. Change in concrete strength through structure thickness: black colour – exponential dependence; blue – linear dependence; green – power dependence; red – quadratic dependence

Таблица 3

Изменение объемного содержания воды в образцах бетона с ростом температуры

Changes in volumetric water content for concrete samples with temperature increase

Слой	Объемное содержание воды, л/м ³ , в образцах при температуре, °C			
	200	400	600	800
Внутренний	156,0 ± 19,7	196,7 ± 38,3	214,1 ± 27,1	216,8 ± 36,6
Средний	101,6 ± 14,1	125,2 ± 20,5	139,4 ± 11,7	145,0 ± 15,9
Наружный	80,9 ± 15,0	100,7 ± 5,4	119,7 ± 11,5	123,3 ± 17,8
Среднее значение	112,8 ± 16,3	140,9 ± 21,4	157,7 ± 16,8	161,7 ± 23,4
Примечание. Интервал результатов измерений представлен при уровне доверительной вероятности 95 %.				

Характер потери воды различными слоями центрифугированной конструкции с ростом температуры, практически определяемый изменением удельной массы образцов, показан на рис. 6.

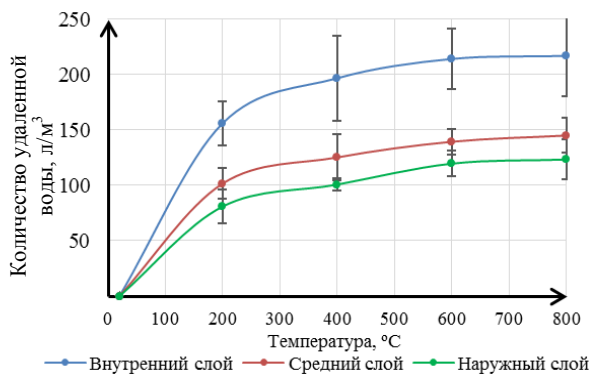


Рис. 6. Характер удаления воды из структуры образцов бетона разного слоя с ростом температуры

Fig. 6. Pattern of water removal from concrete sample structure of different layers with temperature increase

Резкое изменение массы образцов при температурах до (200–300) °C объясняется происходящими физическими процессами, а именно – удалением воды из грубых пор и адсорбированной гелем двух- и трехкальциевого силиката. Поскольку число пор и содержание цемента увеличиваются по мере движения от периферии к центру, как следствие, повышается количество выпаренной воды во внутренних слоях. Некоторая стабилизация количества удаленной воды при температуре до 400 °C связана с тем, что физическая вода уже удалена из пор и происходит лишь процесс удаления воды, находящейся в гелевом пространстве цементного камня. Известно, что основная масса связанной воды теряется при температурах выше 350 °C [18]. Начиная с 400 °C происходит разложение гидроксида кальция [19, 20], сопровождаемое выделением окиси кальция и воды, которая при длительной выдержке при соответствующих температурах также удаляется из структуры бетона. Именно поэтому на участке температур (400–600) °C наблюдается некий скачок кривых, которые до 800 °C плавно переходят в прямые. При плавном нагреве до 800 °C и последующей выдержке в течение 4 ч можно сказать, что структура бетона практически полностью освобождена от химически связанной, адсорбционной и физической воды в порах. Среднее значение изменения объемной массы образцов после нагрева до 800 °C при-

близительно равно содержанию химически и физически связанной воды в структуре бетона (фактическому содержанию воды в бетонной смеси).

Обработка экспериментальных данных касемо удаленной воды при предельной в эксперименте температуре позволила выявить характер распределения воды по сечению центрифугированной бетонной смеси (фактический остаточный расход воды в смеси) (рис. 7).

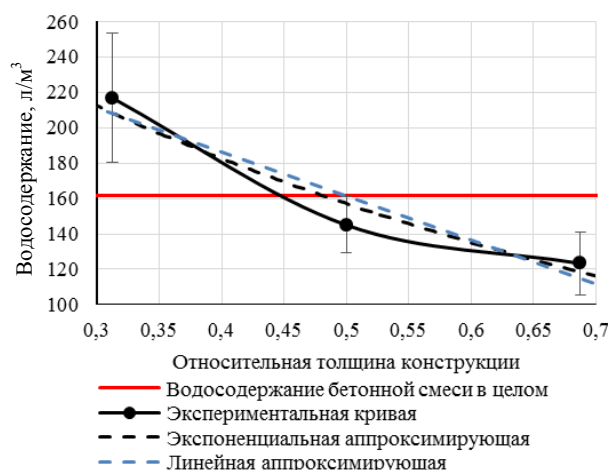


Рис. 7. Водосодержание бетонной смеси по толщине конструкции

Fig. 7. Water content of concrete mixture through structure thickness

Анализ опытных данных показывает, что свойства центрифугированного бетона в по-слойно распиленных образцах существенно изменяются: плотность бетона в образцах наружного слоя оказалась на 8 % больше, чем в образцах внутреннего слоя, прочность бетона больше на 34 %, содержание воды в бетонной смеси во внутренних слоях на 43 % больше, чем в наружных.

В [5] И. Н. Ахвердовым исследовано, что при надлежаще подобранном составе бетона на внутренней поверхности стенки элемента образуются корка шлама, затем идет слой цементного камня, далее – мелкозернистый бетон и потом – бетон обычной структуры. Из рис. 1 видно, что на внутреннем слое конструкции имеется четкое разграничение слоя, состоящего из цемента, песка и воды, не имеющего в своем составе крупного заполнителя, который составляет 1/8 толщины конструкции. От данной границы до периферии наблюдается наличие крупного заполнителя. При этом по мере дви-

жения к периферии по сечению наблюдается сокращение количества ячеек между щебнем и уменьшение их размеров. Следовательно, более высокая прочность наружных слоев центрифугированной конструкции обуславливается повышением относительного содержания гранитного щебня, прочность которого гораздо больше, чем у раствора (бетон без щебня) и цементного камня. Увидеть невооруженным глазом разграничение на внутренней поверхности цементного камня и шлама не удалось.

Общая картина распределения свойств бетона и бетонной смеси по толщине сходна с результатами, полученными И. Н. Ахвердовым [5], В. Л. Щуцким, Д. А. Дедухом и М. Ю. Гриценко [9]. Вместе с тем различие в изменении плотности послойно выпиленных образцов составило около двух раз, различие в изменении прочности – около 40 %, водосодержания бетонной смеси – 3,5 раза.

Используя метод наименьших квадратов, были получены различные регрессивные уравнения, описывающие закономерность изменения плотности и прочности бетона по толщине, а также водосодержания бетонной смеси. Наиболее адекватно закономерности изменения физико-механических свойств отражают экспоненциальная и линейная зависимости (рис. 4, 5). Приведя полученные зависимости к показателям конструкции в целом, были получены уравнения, описывающие изменение прочности и плотности центрифугированного бетона, водосодержания бетонной смеси по сечению в зависимости от свойств изделия в целом (табл. 4).

Для определения средней прочности (плотности) части сечения (конкретного образца, выпиленного из конструкции), водосодержания бетонной смеси вполне допустимо использовать следующую формулу:

$$Y' = \int_{\delta_1}^{\delta_2} Y(\delta) d\delta,$$

где Y' – значение характеристики конкретного образца; $Y(\delta)$ – зависимость, приведенная в табл. 4; δ_1, δ_2 – относительные толщины конструкции, соответствующие внутренней и наружной поверхностям выпиленного образца (сечения).

Следует отметить, что полученные по зависимостям из табл. 4 значения плотности и прочности на внутренней и наружной поверхностях могут быть несколько занижены (завышены), что подтверждается превышением полученного значения плотности на периферии над истинной плотностью конструкции. Согласно данным зависимостям, прочность бетона по мере движения от внутренней поверхности к периферии увеличивается примерно в два раза, а плотность – на 20 %. Необходимо учитывать, что такое существенное различие объясняется исследованием стойки достаточно большой толщины. Поскольку центрифугированный метод подразумевает зачастую изготовление тонкостенных конструкций, а уменьшение толщины конструкций влечет повышение однородности по сечению, данные зависимости подлежат некой корректировке.

Для линейных зависимостей, наиболее гибко используемых в расчетах, общую формулу по определению плотности (прочности) для конструкции толщиной 160 мм можно переписать в виде

$$Y(\delta) = Y_0(A + C\delta),$$

где A, C – эмпирический коэффициент; Y_0 – характеристика материала в целом.

Таблица 4

Зависимости изменения физико-механических свойств по сечению
Dependences of changes in physical and mechanical properties over cross section

Характеристика бетона (бетонной смеси)	Зависимость, описывающая закономерность изменения характеристики по сечению	
	линейного вида	экспоненциального вида
Плотность ρ	$\rho(\delta) = \rho_0 \cdot (0,899 + 0,204\delta)$	$\rho(\delta) = \rho_0 e^{0,206\delta - 0,102}$
Прочность P	$P(\delta) = P_0(0,597 + 0,743\delta)$	$P(\delta) = P_0 e^{0,785\delta - 0,432}$
Водосодержание B	$B(\delta) = B_0(1,735 - 1,511\delta)$	$B(\delta) = B_0 e^{-1,504\delta + 0,703}$
Примечание. Характеристики с индексом «0» относятся к конструкции в целом; δ – относительная толщина конструкции (от 0 до 1).		

По мнению авторов статьи, данная функция подлежит корректировке дополнительными коэффициентами k_1 и k_2 , учитывающими повышение однородности структуры с уменьшением толщины бетонного изделия, зависящими от толщины изготовленного элемента:

$$Y(\delta) = Y_0(Ak_1 + C\delta k_2).$$

Если две конструкции разной толщины имеют одинаковые физико-механические характеристики в целом, то можно записать:

$$\int_0^1 Y_0(A + C\delta)d\delta = \int_0^1 Y_0(Ak_1 + C\delta k_2)d\delta;$$

$$Ak_1 + \frac{Ck_2}{2} = A + \frac{C}{2};$$

$$k_2 = 1 + \frac{2A(1 - k_1)}{C}.$$

Предположив, что однородность повышается пропорционально уменьшению толщины, запишем $k_2 = \frac{b}{b_0}$, где b – толщина заданной конструкции, мм; $b_0 = 160$ мм – толщина исследованной конструкции.

С учетом полученных в ходе исследования значений A и C , имеем:

$$\text{– при расчете плотности } k_1 = \left(9,8 - \frac{b}{b_0}\right)/8,8;$$

$$\text{– при расчете прочности } k_1 = \left(2,6 - \frac{b}{b_0}\right)/1,6;$$

$$\text{– при определении водосодержания бетонной смеси } k_1 = \left(1,3 + \frac{b}{b_0}\right)/2,3.$$

Вышеописанные зависимости линейного вида из табл. 4 с учетом коэффициентов k_1 и k_2 более приемлемо использовать для инженерных расчетов.

Интересным представлялось рассмотреть вопрос зависимости прочности центрифугированного бетона от действия центробежной силы инерции. Учитывая, что данная сила, воздействию которой подвергаются частицы бетонной смеси в процессе центрифугирования, пропорциональна массе вращающегося твердого тела M , кг, рас-

стоянию от оси вращения до центра зерна r , м, и угловой скорости вращения ω , рад/с, можно записать следующую зависимость:

$$F_{цб} = M\omega^2 r = \rho V\omega^2 r,$$

где V – объем зерна, м³.

Очевидно, что данная сила будет принимать наибольшее значение вблизи стенок вращающейся формы. Прочность в периферийных слоях оказывается больше, чем во внутренних. Значит, прочность бетона прямо пропорциональна центробежной силе, действующей на смесь в процессе изготовления, т. е. $P \sim F_{цб}$. Приняв равными рассматриваемые элементарные объемы структуры бетона и учитывая, что все точки бетонной смеси при вращении формы имеют одинаковую скорость вращения, можно записать:

$$P \sim Kpr.$$

Увеличение прочности прямо пропорционально росту произведения плотности и расстояния от оси вращения до рассматриваемой точки (рис. 8). Среднее значение коэффициента пропорциональности K составило 0,041 МН/кг.

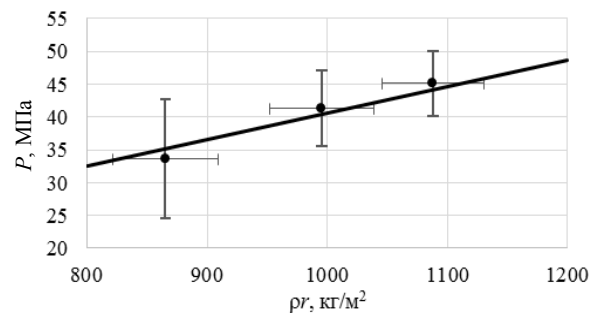


Рис. 8. Зависимость прочности центрифугированного бетона от произведения его плотности на расстояние до рассматриваемой точки

Fig. 8. Dependence of centrifuged concrete strength on product of its density by distance to the point under consideration

В практических расчетах имеется необходимость взаимосвязи прочности бетона с его плотностью напрямую. Обработка экспериментальных данных позволила выявить зависимость между плотностью и прочностью центрифугированного бетона исследуемого состава (рис. 9).

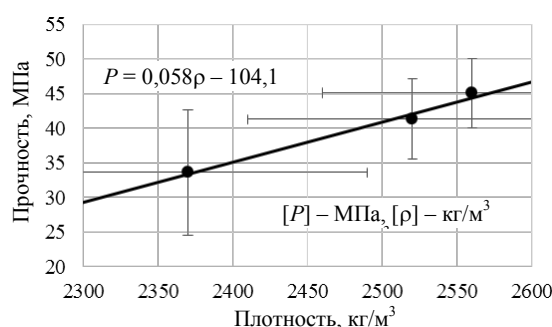


Рис. 9. Зависимость прочности центрифугированного бетона от его плотности

Fig. 9. Dependence of centrifuged concrete strength on its density

Как видим из рис. 9, при изготовлении конструкций методом центрифугирования прочность бетона при прочих равных условиях прямо пропорциональна его плотности.

ВЫВОДЫ

1. Центрифугированный бетон обладает существенной неоднородностью по толщине сечения готового изделия. Внутренние слои конструкции заняты в основном шламом, раствором и цементным камнем. Начиная с относительной толщины 0,125 наблюдается увеличение относительного содержания крупного заполнителя. Наружные слои состоят в основном из крупного заполнителя, ячейки между которым заполнены раствором. Количество и объем ячеек по мере движения к периферии уменьшаются.

2. Физико-механические свойства центрифугированного бетона меняются в широких пределах. Плотность в исследованных образцах внутреннего слоя на 8 % меньше, чем наружного слоя, водосодержание бетонной смеси на 43 % больше. Прочность на сжатие бетонных образцов наружного слоя на 26 % превышала прочность образцов, выпиленных из внутреннего слоя конструкции, что объясняется образующимся в процессе изготовления составом.

3. Получены уравнения, описывающие изменение физико-механических свойств по сечению в зависимости от свойств конструкции в целом и ее параметров, что позволяет рассчитывать необходимые при проектировании характеристики такого бетона. Согласно зависимостям, прочность в периферийных слоях

центрифугированной конструкции толщиной 160 мм при однослойном формировании больше в два раза, чем во внутренних слоях, что свидетельствует об увеличении жесткости наружных слоев, и, соответственно, восприятию ими основных нагрузок.

4. Выявлена взаимосвязь прочности центрифугированного бетона с действием центробежной силы инерции. Получена эмпирическая формула для перехода от плотности центрифугированного бетона исследуемого состава к его прочности, и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
2. Давидюк, А. Н. Бетон в строительстве – новые вызовы и перспективы / А. Н. Давидюк // Вест. НИЦ «Строительство». 2017. Т. 12, № 1. С. 5–13.
3. Пастушков, В. Г. Опыт применения центрифугированных линейных элементов с поперечными сечениями различного профиля при строительстве многоэтажных зданий: строительство / В. Г. Пастушков, Г. П. Пастушков // Архитектура и строительные науки. 2014. Т. 18, 19, № 1, 2.
4. Иванов, В. П. Исследование и разработка технологии монтажа каркасов промышленных зданий с применением центрифугированных колонн кольцевого сечения / В. П. Иванов. Минск, 1984. 185 с.
5. Ахвердов, И. Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1967. 163 с.
6. Дутка, Р. Т. Технология центрифугирования и влияние состава бетона на режим центрифугирования / Р. Т. Дутка // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013. Вып. 52. С. 91–94.
7. Informationen Rund um Schleuderbeton [Electronic Resource]. Mode of access: <http://schleuderbeton.de/vorteile.htm>. Date of access: 17.08.2018.
8. Zerstörende Großversuche an Hochbewehrten Schleuderbetonstützen / S. L. Burtcher [et al.] // Bauingenieur. April 2003. Band 78. P. 187–193.
9. Щуцкий, В. Л. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона [Электронный ресурс] / В. Л. Щуцкий, Д. А. Дедух, М. Ю. Гриценко // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2, ч. 2. Режим доступа: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81_Shucki.pdf_4abcf9232c.pdf.
10. Руководство по проектированию, изготовлению и применению железобетонных центрифугированных конструкций кольцевого сечения // Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1979. 144 с.
11. Леонович, С. Н. Долговечность центрифугированных железобетонных стоек: обзорная информация / С. Н. Леонович, Л. Н. Зикеев. М.: Информэнерго, 1991. 64 с.

12. Тарасов, В. В. Исследования центрифугированных железобетонных элементов кольцевого сечения с продольным сосредоточенным армированием бетона / В. В. Тарасов. Киев: Науч.-исслед. ин-т строит. констр., 1983. 26 с.
13. Технологические правила изготовления центрифугированных стоек опор контактной сети, линий связи и автоблокировки: ВСН 1–90. Взамен ВСН-1–67 и ВСН-7–58. Введ. 07.08.1990. М.: Всесоюз. ордена Окт. революции НИИ трансп. стр-ва, 1990. 55 с.
14. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций: ГОСТ 28570–90. Введ. 01.01.1991. М.: Изд-во стандартов, 1990. 11 с.
15. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартиформ, 2013. 36 с.
16. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ 8.207–76. Введ. 01.01.1977. М.: Изд-во стандартов, 1986. 8 с.
17. Кравченко, Н. С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н. С. Кравченко, О. Г. Ревинская. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. 86 с.
18. Зенков, Н. И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара / Н. И. Зенков. М.: ВИПТИШ МВД СССР, 1974. 174 с.
19. Hermann, K. Brandverhalten von Beton / K. Hermann // Cementbulletin. 1992. No 10. P. 1–8.
20. Милованов, А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А. Ф. Милованов. М.: Стройиздат, 1998. 304 с.
- Academy of Civil Engineering and Architecture, (52), 91–94 (in Russian).
7. Informationen Rund um Schleuderbeton Available at: <http://schleuderbeton.de/vorteile.htm> (Accessed 17 August 2018).
8. Burtscher S. L., Rinnhofer G., Benko V., Kollegger J. (2003) Destructive Large-Scale Tests on Highly Reinforced Spun Concrete Columns [Zerstörende Großversuche an Hochbewehrten Schleuderbetonstützen]. *Bauingenieur*, 78, 187–193 (in German).
9. Shchutsky V. L., Dedukh D. A., Gritsenko M. Yu. (2015) Investigations on Physical and Mechanical Properties of Centrifugal Concrete. *Inzhenerny Vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, (2), part 2. Available at: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81_Shucki.pdf_4abcf9232c.pdf.
10. Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete of USSR State Committee for Construction (1979) *Guide on Design, Fabrication and Application of Reinforced Concrete Centrifugal Structures of Annular Section*. Moscow, Stroyizdat Publ. 144 (in Russian).
11. Leonovich S. N., Zikeev L. N. (1991) *Longevity of Centrifugal Reinforced Concrete Posts: Survey Information*. Moscow, Informenergo Publ. 64 (in Russian).
12. Tarasov V. V. (1983) *Investigations of Centrifugal Reinforced-Concrete Elements of Annular Section with Longitudinal Concentrated Reinforcement of Concrete*. Kiev, Research Institute of Building Structures. 26 (in Russian).
13. BCH [Industry-Specific Construction Standards] 1–90. *Technological Rules for Fabrication of Centrifugal Posts for Contact Network, Communication Lines and Automatic Block System*. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Transport Construction Awarded with Order of the October Revolution, 1990. 55 (in Russian).
14. State Standard 28570–90. *Concrete. Methods for Determination of Strength According to Specimens Taken from Structures*. Moscow, Publishing House of Standards, 1990. 11 (in Russian).
15. State Standard 10180–2012. *Concrete. Methods for Determination of Strength According to Control Specimens*. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 36 (in Russian).
16. State Standard 8.207–76. *State System for Ensuring Uniform Measurement. Direct Measurements with Multiple Observations. Methods for Processing Observation Results. Fundamental Principles*. Moscow, Publishing House of Standards, 1986. 8 (in Russian).
17. Kravchenko N. S., Revinskaya O. G. (2011) *Methods for Processing Results of Measurements and Assessment of Errors in Training Laboratory Workshop*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnical University 86 (in Russian).
18. Zenkov N. I. (1974) *Construction Materials and their Behavior During Fire*. Moscow, Publishing House of Higher Engineering Fire-Technical School, Ministry of Internal Affairs of the USSR. 174 (in Russian).
19. Hermann K. (1992) Brandverhalten von Beton. *Cementbulletin*, (10), 1–8.
20. Milovanov A. F. (1998) *Resistance of Reinforced Concrete Structures During Fire*. Moscow, Stroyizdat Publ. 304 (in Russian).

Поступила 21.01.2019

Подписана в печать 26.03.2019

Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroyizdat Publ. 464 (in Russian).
2. Davidyuk A. N. (2017) Concrete in Construction – New Challenges and Prospects. *VESTNIK NITs "Stroitel'stvo" = Bulletin of Science and Research Center "Stroytelstvo"*, 12 (1), 5–13 (in Russian).
3. Pastushkov V. G., Pastushkov G. P. (2014) Experience on Application of Centrifugal Linear Elements with Cross-Sections of Various Profile while Constructing Multi-Storey Buildings: Construction. *Arkhitektura i Stroitelnye Nauki* [Architecture and Construction Sciences], 18, 19 (1, 2), 36–38 (in Russian).
4. Ivanov V. P. (1984) *Investigation and Development of Technology for Installation of Industrial Building Framework while Using Centrifugal Columns of Annular Section*. Minsk. 185 (in Russian).
5. Akhverdov I. N. (1967) *Reinforced Concrete Pressure Centrifugal Pipes*. Moscow, Stroyizdat Publ. 163 (in Russian).
6. Dutka R. T. (2013). Technology of Centrifugal Process and Influence of Concrete Composition on Centrifugal Process Regime. *Visnik Odes'koï Derzhavnoï Akademii Budivnitsva ta Arkhitekturi = Bulletin of Odessa State*

Received: 21.01.2019

Accepted: 26.03.2019

Published online: 31.07.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338>

УДК 666.972; 693.54

Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона

Магистр техн. наук Н. С. Гуриченко¹⁾, докт. техн. наук, проф. Э. И. Батыновский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку новой полифункциональной добавки в бетон, обеспечивающей повышение темпа и уровня роста его прочности при снижении энергетических затрат на ускорение процесса твердения, как базы для снижения энергоёмкости производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Экспериментально выявлено рациональное соотношение компонентов полифункциональной добавки от массы цемента: суперпластификатор на основе поликарбоксилатных смол (например, «Стахемент 2000» или «Реламикс ПК») – 0,5 %, ультрадисперсный микрокремнезем (SiO_2) – 1,0 %, сульфат натрия (Na_2SO_4), ускоритель твердения – 0,5 %, сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), уплотняющий структуру добавки, – 0,25 %. Перечисленные компоненты обеспечивают наибольший рост прочности цементного камня и конструкционного тяжелого бетона. Результаты дериватографического и рентгенофазового анализов показывают, что рост прочности базируется на образовании мелкокристаллической формы низкоосновных кристаллогидратов силикатной группы CSH, дополняющей традиционно формирующиеся при реакции трех- и двухкальциевого силиката цемента с водой – C_2SH , а также на увеличении количества новообразований за счет реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с аморфным SiO_2 и этtringита $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, образующегося за счет реакций с алюминатами цемента вещества ускоряюще-уплотняющего компонента добавки, что в совокупности обеспечивает рост плотности и прочности цементного камня. В бетоне эффект дополняется упрочнением зоны контакта поверхности заполнителя с цементным камнем за счет реакции между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и SiO_2 . Эти эффекты подтверждены ростом (до 38 %) химически связанной цементной воды в присутствии полифункциональной добавки в пробах цементного камня, характеризовавшегося наибольшей прочностью. С использованием стандартизованных методик испытаний экспериментально подтверждена эффективность полифункциональной добавки, выразившаяся в росте качественных характеристик и свойств конструкционного тяжелого бетона: прочности на сжатие – до 40–60 %, в растяжении при изгибе – до 15, снижении усадки – до 50 % и водопоглощения – в 1,5–2 раза, росте морозостойкости с марки F250 до F500, водонепроницаемости с W6–W8 до W20.

Ключевые слова: полифункциональная добавка, микрокремнезем, ультрадисперсный микрокремнезем, цементный камень, бетон, высокопрочный бетон, прочность, свойства

Для цитирования: Гуриченко, Н. С. Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона / Н. С. Гуриченко, Э. И. Батыновский // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-330-338>

Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete

N. S. Gurinchenko¹⁾, E. I. Batyanovskiy¹⁾

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

Abstract. The paper presents results of research aimed at developing a new semi-functional concrete additive that provides an increase in rate and level of its strength growth while reducing energy costs to accelerate hardening process, as a basis for reducing energy intensity in manufacturing of concrete and reinforced concrete products and structures. Experimentally

Адрес для переписки

Батыновский Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Колоса, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-95-87
tbsm@bntu.by

Address for correspondence

Batyanovskiy Eduard I.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-95-87
tbsm@bntu.by

a rational ratio of components for a polyfunctional additive has been found of mass cement: a superplasticizer based on polycarboxylate resins (for example, "Stachement 2000" or "Relamiks PC") – 0.5 %, ultradispersed microsilica (SiO_2) – 1.0 %, sodium sulfate (Na_2SO_4), hardening accelerator – 0.5 %, aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), sealing additive structure – 0.25 %. The mentioned components ensure the largest increase in strength of cement stone and structural heavy concrete. Results of derivatographic and X-ray phase analyses have shown that strength growth is based on formation of a fine-crystalline form of low-base crystalline silicates of CSH-silicate group, which complements traditionally formed C_2SH by the reaction of three- and two-calcium silicate cement with water, as well as it is based on an increase in the number of neoplasms due to the reaction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with amorphous SiO_2 and ettringite $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, being formed due to reactions with cement aluminates these are accelerating-compacting additive components, that in total provides an increase in density and strength of cement stone. While having the case with concrete, the effect is complemented by hardening the zone of contact between aggregate surface and cement stone due to the reaction between $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and SiO_2 . These effects have been confirmed by growth (up to 38 %) of water which is chemically bound with cement in presence of a multifunctional additive in samples of cement stone, which is characterized by the largest strength. While using standardized testing methods, effectiveness of a multifunctional additive has been experimentally confirmed and it has been expressed in growth of quality characteristics and properties of structural heavy concrete: compressive strength – up to 40–60 %, flexural strength – up to 15 %, reduction of shrinkage – up to 50 % and water absorption – by 1.5–2 times, increase in frost resistance from brand F250 to F500, water resistance – from W6–W8 to W20.

Keywords: polyfunctional additive, microsilica, ultradispersed microsilica, cement stone, concrete, high strength concrete, strength, properties

For citation: Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. (2019) Influence of Polyfunctional Additive on Hardening Process and Properties of Cement Concrete. *Science and Technique*. 18 (4), 330–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-330-338> (in Russian)

Введение

Одной из важнейших задач строительной отрасли Беларуси является снижение энергопотребления в строительном производстве. При изготовлении сборных бетонных и железобетонных изделий и строительстве из монолитного бетона и железобетона эту задачу можно решить за счет использования химических и минеральных добавок. Например, тех из них, которые обеспечивают повышение темпа роста прочности бетона, позволяют снижать температуру (особенно это важно в начальный период – 24–72 ч) твердения и сокращать время подвода тепла к бетону. При этом наиболее перспективно направление по разработке комплексных добавок, в которых сочетаются разные эффекты воздействия на реагирующую систему «цемент – вода» в цементном бетоне, взаимно дополняющие друг друга. В частности, многокомпонентные вещества, составляющие которых способствуют снижению начального водосодержания, развитию процессов гидриза-гидратации цемента, зарождению кристалло-гидратных новообразований, их ускоренному образованию, а на этой основе – ускоренному формированию плотной структуры цементного камня и бетона, обеспечивают как высокий темп роста прочности бетона, так и уровень всей совокупности его физико-технических свойств.

Материалы для исследований

В исследованиях использовали материалы: портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178–85, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ EN 197-1; компоненты полифункциональной добавки: ускоритель твердения сульфат натрия (CH ; Na_2SO_4) по ГОСТ 21458–75 и уплотняющий структуру цементного камня (бетона) сульфат алюминия (CA ; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) по ГОСТ 12966–85; заполнители для бетона – щебень гранитный традиционный фракций 5–10 и 5–20 мм (ГОСТ 8267–93) и щебень кубовидный фракций 2–4 и 4–6 мм (СТБ 1311–2002); песок природный Мк ~ 2,6–2,8 (ГОСТ 8736–93); в качестве активного минерального компонента добавки – традиционный микрокремнезем МК-85 (МК), соответствующий требованиям СТБ EN 197-1–2015, и ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК), соответствующий ТУ 2168-002-14344269–09, характеризующийся большей удельной поверхностью за счет малых размеров частиц аморфного SiO_2 , а значит, и большим «реакционным» потенциалом, что подтверждают данные сравнительного гранулометрического анализа дисперсности традиционного микрокремнезема (МК) (рис. 1а) и ультрадисперсного микрокремнезема (УДМК) (рис. 1б), полученные с помощью прибора для измерения дисперсности твердофазных материалов Analysette 22, Nano Tec (Fritsch).

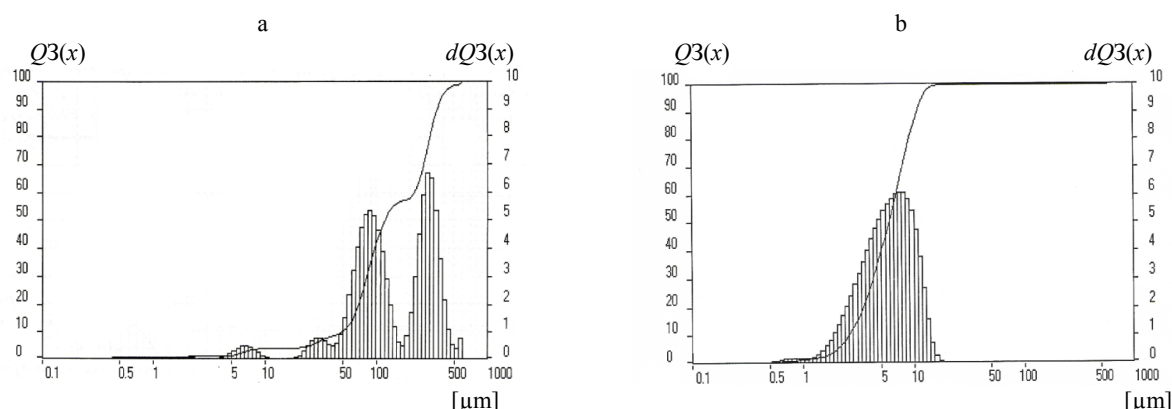


Рис. 1. Гранулометрический состав: а – микрокремнезема; б – ультрадисперсного микрокремнезема

Fig. 1. Granulometric composition: a – microsilica; b – ultradispersed microsilica

В качестве пластификаторов использовали «Стахемент 2000-М Ж 30» (Ст), выпускаемый по ТУ ВУ 800013176.004–2011, С-3 (ТУ 5745-001-97474489–2007) и «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 1906 79156.002–2013), которые согласно СТБ 1112–98 относятся к пластифицирующим добавкам I группы.

Целью исследований было получение комплексной полифункциональной добавки, характеризующейся пластифицирующим и ускоряющим твердение бетона действием. Для ее достижения на начальном этапе исследовали кинетику роста прочности цементного камня и особенности его структурно-морфологических характеристик, выявленных с помощью рентгенофазового и дериватографического анализов, а также при оценке количества химически связываемой цементом воды и степени его гидратации.

Свойства цементного камня

В графическом виде (рис. 2) частично приведены экспериментально выявленные изменения в кинетике твердения (в нормально-влажных условиях) образцов (20×20×20 мм; 6–12 шт. в серии) цементного камня без добавки (№ 1), с добавкой пластификатора 0,5 % Ст (№ 2), с пластификатором и микрокремнеземом 0,5 % Ст + 10 % МК (№ 3), с пластификатором и ультрадисперсным микрокремнеземом в разных количествах: 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК (№ 4), 0,5 % Ст + 1,5 % УДМК (№ 5) и с полифункциональной комплексной добавкой, включающей пластификатор, ультрадисперсный микрокремнезем и ускоряюще-уплотняющую составляющую (СН + СА) в состав

ве 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (№ 6). Все образцы были изготовлены из теста нормальной густоты ($K_{нг} = 0,255$ доли ед. (чистый цемент), $K_{нг} = 0,20$ доли ед. (с пластификатором)).

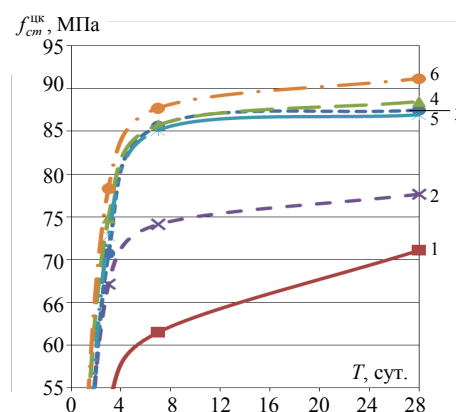


Рис. 2. Кинетика твердения цементного камня:

№ 1 – без добавок; № 2 – 0,5 % Ст;
№ 3 – 0,5 % Ст + 10 % МК; № 4 – 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК;
№ 5 – 0,5 % Ст + 1,5 % УДМК;
№ 6 – 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА

Fig. 2. Kinetics of cement stone hardening:

No 1 – without additives; No 2 – 0.5 % Stachement (St);
No 3 – 0.5 % St + 10 % microsilica (MC);
No 4 – 0.5 % St + 1.0 % ultradispersed microsilica (UDMC);
No 5 – 0.5 % St + 1.5 % UDMC; No 6 – 0.5 % St +
+ 1.0 % UDMC + 0.5 % sodium sulfate (SS) +
+ 0.25 % aluminum sulfate (AS)

Очевидно практическое совпадение по значениям прочности цементного камня, содержащего 10 % традиционного микрокремнезема (№ 3) и 1,0 % УДМК (№ 4) от массы цемента (при соблюдении правила прочих равных условий). Также очевиден эффект от введения в цементный камень полифункциональной комплексной добавки, которую готовили в виде водного раствора в воде затворения требуемого количества

сульфата натрия, сульфата алюминия и пластификатора, затем вводя в него в расчетном количестве ультрадисперсный микрокремнезем.

С учетом того обстоятельства, что введение с разрабатываемой добавкой аморфного кремнезема в цементный бетон способствует связыванию гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в нерастворимые гидросиликаты кальция и может понизить за этот счет уровень щелочности среды в бетоне, провели соответствующую оценку влияния УДМК на данный показатель. Измерения проводили с помощью портативного рН-метра марки HI 83141 (табл. 1). Очевидно, что исследуемое вещество (УДМК) в целом не критически снижает рН-фактор и, соответственно, при использовании его в железобетоне не потребуются дополнительной защиты арматуры.

Одной из задач исследований, выполненных по методике, описанной в [3], была оценка вли-

яния разрабатываемой полифункциональной добавки на тепловыделение цемента, поскольку тепло экзотермии позволяет существенно снизить энергетические затраты на ускорение твердения бетона как в производстве сборных изделий, так и в монолитном строительстве (рис. 3).

Очевидно, что на начальную фазу процесса гидратации цемента с добавками замедляющее влияние (№ 2) оказывает вещество пластификатора, молекулы поверхностно-активной составляющей которого частично «блокируют» поверхность частиц (флокул) вяжущего и сдерживают развитие его реакций с водой затворения. Также очевидно, что введение 10 % МК (№ 3), 1,0 % УДМК (№ 4) и 1,5 % УДМК (№ 5) характеризуется практически равенством их влияния на тепловыделение цемента и саморазогрев цементного камня в оцениваемых временных пределах при соблюдении правила прочих равных условий.

Таблица 1

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

Время твердения	Без добавок	0,5 % Ст	0,5 % Ст + + 10 % МК	0,5 % Ст + + 1,0 % УДМК	0,5 % Ст + + 1,5 % УДМК	0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + + 0,5 % СН + 0,25 % СА
1 мин	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
2 мин	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3
10 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
30 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
60 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
2 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
10 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
20 сут.	12,70	12,71	12,69	12,65	12,63	12,55
30 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50
60 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50

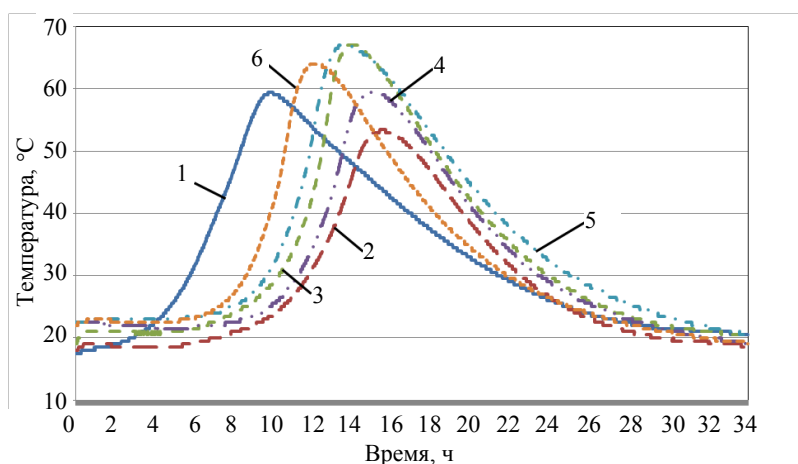


Рис. 3. Кинетика изменения температуры цементного теста: № 1–6 – то же, что на рис. 2

Fig. 3. Kinetics of temperature changes in cement paste: No 1–6 – the same as in fig. 2

Логично, что наибольший эффект по совокупности явлений темпа саморазогрева и уровня температуры обеспечило введение полифункциональной добавки (№ 6), в состав которой входит ускоряюще-уплотняющий компонент, способствующий ускорению процесса гидратации цемента. Эти результаты подтверждают данные оценки

степени гидратации цемента (табл. 2; рост в пробах с полифункциональной добавкой составил ~38 %), а также дериватографический (термогравиметрический анализатор TGA/DSC1-1/1600 HF (METTLER TOLEDO), рис. 4) и рентгенофазовый анализы (дифрактометр D8 Advance (Bruker AXS, Германия); рис. 5) проб цементного камня.

Таблица 2

Результаты определения степени гидратации цемента

Results of determining degree of cement hydration

№ пробы	Состав пробы	Масса пробы, г		Количество воды, доли ед.		Степень гидратации цемента, %
		высушенной при $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$	прокаленной при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	химически связанной	связанной при полной гидратации цемента	
1	Без добавки	7,71	6,90	0,1174	0,227	51,71
2	0,5 % Ст	6,22	5,55	0,1207		53,18
3	0,5 % Ст + 10 % МК	6,22	5,43	0,1455		64,09
4	0,5 % Ст + 1,0 % УДМК	8,22	7,15	0,1490		65,62
5	0,5 % Ст + 1,5 % УДМК	8,72	7,53	0,1580		69,62
6	0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА	8,75	7,53	0,1620		71,37

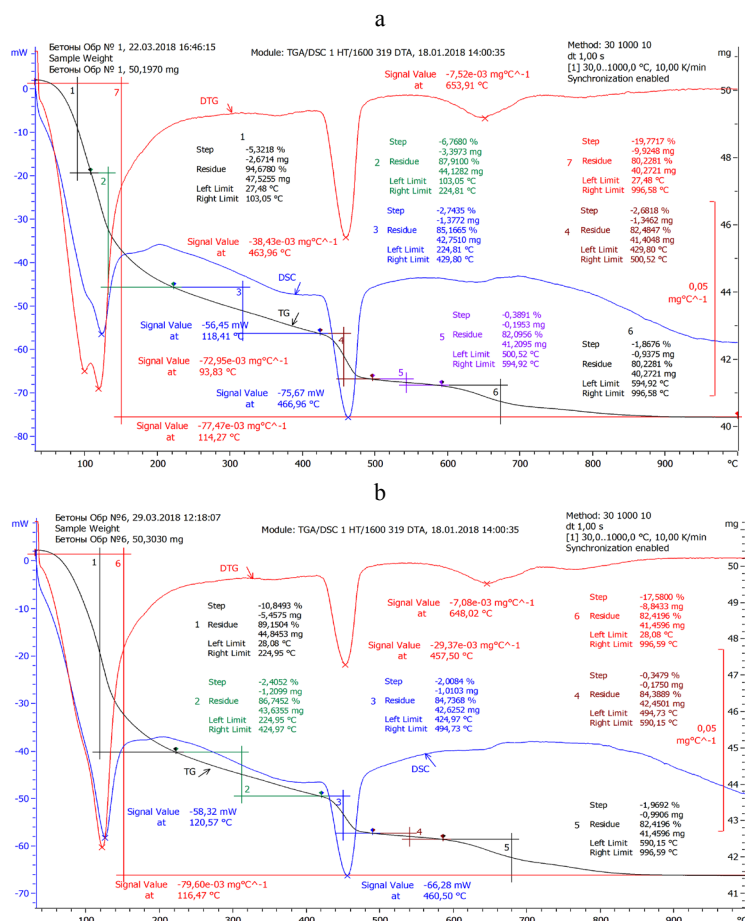


Рис. 4. Дериватографический анализ пробы «чистого» цементного камня (а) и цементного камня, содержащего 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (б) от массы цемента

Fig. 4. Derivatographic analysis for sample of "pure" cement stone (a) and cement stone containing 0.5 % St + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS (b) by weight of cement

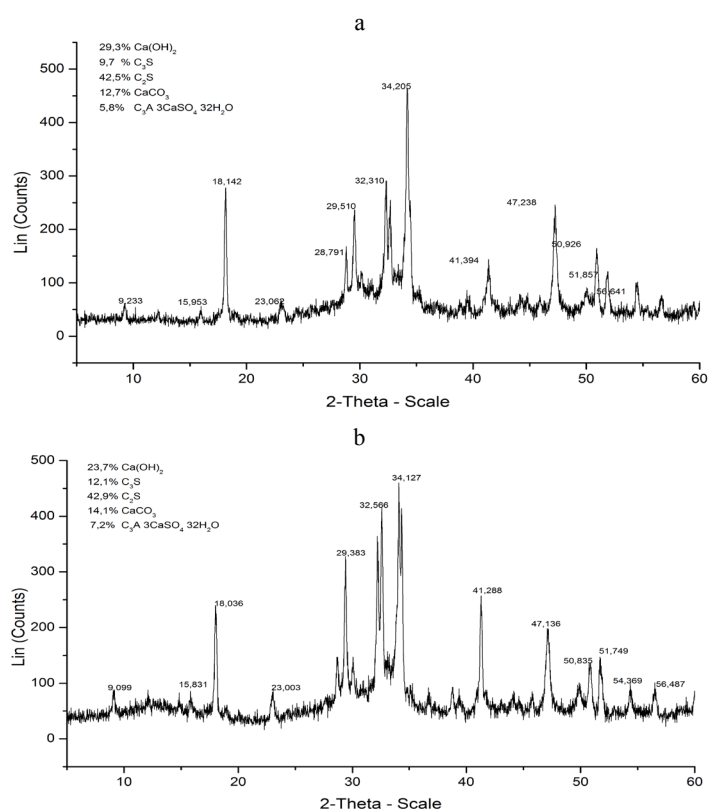


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ пробы «чистого» цементного камня (а) и цементного камня, содержащего 0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (б) от массы цемента

Fig. 5. X-ray phase analysis for sample of "pure" cement stone (a) and cement stone containing 0.5 % St + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS (b) by weight of cement

Анализ графиков DSC и DTG на рис. 4а (проб «чистого» цементного камня) с рис. 4б (проб с полифункциональной добавкой) показывает, во-первых, разницу в зоне температуры 110 °С, отражающей потери «свободной» (находящейся в поровом пространстве проб цементного камня) воды. Снижение показателя проб «чистого» камня составляет 70 мВт, а проб с добавкой 60 мВт, т. е. существенно меньше. Это свидетельствует об уменьшении объема пор в пробах цементного камня с добавкой, т. е. о росте плотности его структуры. Во-вторых, существенно уменьшилась площадь эндотермического «пика» в зоне температур (420–480) °С, отражающего разложение гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), что свидетельствует о его «связывании» аморфным SiO_2 с образованием гидросиликатов кальция.

Как следствие, увеличилась площадь эндотермического «пика» в зоне температур (650–750) °С; при этом в пробах с добавкой снижается уровень минимальной температуры разложения: с 653,91 °С (проба без добавок) до 648,91 °С

(проба с добавкой), что связано с появлением низкоосновных силикатов кальция [4, 5]. Результаты рентгенофазового анализа (рис. 5) по оценке возможных изменений в морфологии продуктов гидратации цемента под влиянием веществ полифункциональной добавки подтвердили ранее полученные данные (в статье не приводятся) для ускоряюще-уплотняющего компонента (0,5 % СН + 0,25 % СА) этой добавки о появлении гидросиликатов кальция низкой основности CSH и увеличении количества этtringита. Кроме этого, отличие заключается в снижении количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с 29,3 до 23,7 % для пробы с полифункциональной добавкой при уменьшении отражений клинкерных минералов цемента, что свидетельствует о росте степени его гидратации и согласуются с ранее приведенными (табл. 2) данными.

Свойства бетона

Дальнейшие исследования проводили на тяжелом бетоне. Была разработана технология приготовления полифункциональной комплексной добавки, включающая подготовку водного раствора ускоряюще-уплотняющих компонентов Na_2SO_4 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ введением требуемого количества этих веществ в воду, подогретую до (30–35) °С, так как это оптимальная температура для растворения сульфата натрия. Затем в этот раствор вводили в расчетном количестве пластификатор, для которого указанная температура также является оптимальной. Последним компонентом в подготовленный раствор из трех указанных веществ дозировали требуемое количество ультрадисперсного микрокремнезема. Полученный раствор-дисперсию в процессе приготовления и перед применением механически перемешивали, смешивали в требуемом количестве с водой затворения и вводили в бетон. Период устойчивого сохранения свойств раствора-дисперсии в состоянии покоя (без признаков седиментации кремнезема) составлял 45–60 мин при механическом перемешивании (мешалки, барботаж сжатым воздухом) и не менее 7 сут. при ультразвуковой (кавитационной) обработке на стадии приготовления.

Оценку влияния разрабатываемой добавки (с учетом изменения соотношения компонентов

в ней) на кинетику роста и уровень прочности (сжатие и изгиб) на начальной стадии экспериментов произвели на тяжелом мелкозернистом бетоне (здесь эти данные не приводятся, так как соотносятся с данными для бетона с крупным заполнителем). Одновременно на мелкозернистом бетоне оценили важное следствие использования добавок в бетон, заключающееся в их влиянии на усадочные деформации (ГОСТ 24544–81; табл. 3), особенно при твердении цементного бетона в воздушно-сухих условиях ($\phi \sim 40\%$, $t = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$). Для мелкозернистого бетона эти деформации значительнее, чем для бетона с крупным заполнителем, что может сопровождаться трещинообразованием (ухудшением качества бетона).

Результаты экспериментов свидетельствуют о снижении (на $\geq 20\%$) усадки бетона при замене МК на УДМК, а также практически в два раза – при использовании разрабатываемой добавки, что (как мы считаем) связано с ранее выявленным увеличением под влиянием ее вещества количества этtringита в новообразованиях цементного камня и большим количеством кристаллогидратов силикатной группы, способствующих росту его плотности. Следствием является установленное снижение усадочных деформаций.

В современных условиях ведения бетонных работ и производства сборных изделий микрокремнезем и добавки его содержащие вводят [6–9] в основном в состав высокопрочных бетонов, а также для обеспечения повышенных характеристик в части плотности и непроницаемости «рядового» по прочности бетона ряда конструкций (изделий). В этой связи одной из

задач была оценка возможности замены микрокремнезема в его составе на ультрадисперсный микрокремнезем при дозировке последнего в 10 раз меньше, но без снижения прочности бетона. Реализация такого решения позволяет существенно упростить технологию приготовления конструкционного бетона (для бетона прочностью до 60–70 МПа здесь материал не приводится) за счет введения УДМК в виде дисперсии с водой затворения. Не менее значимой является задача по обеспечению прочности бетона более 100 МПа [10], полученного из литых бетонных смесей ($OK > 21\text{ см}$), которую решили применением разработанной полифункциональной добавки (в данных экспериментах с повышенным содержанием пластификатора «Реламикс ПК» (Рел) – около 1,0 % от массы цемента по сухому веществу) (рис. 6). Номинальный состав бетона: цемента – 500 кг; песок – 570 кг; щебень кубовидный фракции 2–4 – 350 кг, фракции 4–6 – 760 кг; подвижность марок П2 и П5 при $V/C_{П2} \sim 0,28$ долей ед. и $V/C_{П5} \sim 0,29$ долей ед. соответственно [10].

По совокупности результатов экспериментов с высокопрочным бетоном подтверждена возможность замены традиционно применяемого микрокремнезема на ультрадисперсный микрокремнезем с эффектом 10-кратного снижения расхода последнего, что позволяет упростить технологию и организацию процесса его введения в приготавливаемую бетонную смесь, а в целом – упростить технологию получения конструкционного бетона с использованием разработанной полифункциональной добавки, содержащей УДМК.

Таблица 3

Результаты определения усадки мелкозернистого бетона

Results of determining shrinkage of fine concrete

Возраст образца, сут.	0,5 % Ст + 10 % МК		0,5 % Ст + 1,0 % УДМК		0,5 % Ст + 1,0 % УДМК + + 0,5 % СН + 0,25 % СА	
	Δl , мм	$\varepsilon_{ус}$, %	Δl , мм	$\varepsilon_{ус}$, %	Δl , мм	$\varepsilon_{ус}$, %
1	0	0	0	0	0	0
3	0,08	0,05	0,06	0,04	0,04	0,03
7	0,10	0,06	0,08	0,05	0,05	0,03
14	0,14	0,09	0,12	0,07	0,07	0,04
21	0,17	0,11	0,14	0,09	0,09	0,06
28	0,21	0,13	0,16	0,10	0,10	0,06

Примечание. Δl , $\varepsilon_{ус}$ – абсолютная и относительная деформации соответственно.

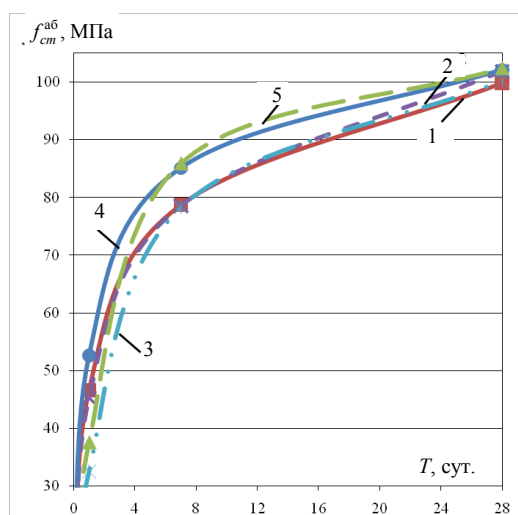


Рис. 6. Тенденция роста прочности бетона:

№ 1 – 0,5 % Рел + 10 % МК;

№ 2 – 0,5 % Рел + 1,0 % УДМК;

№ 3 – 1,0 % Рел + 1,0 % УДМК (П5);

№ 4 – 0,5 % Рел + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА;

№ 5 – 1,0 % Рел + 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (П5)

Fig. 6. Tendency of increasing concrete strength:

No 1 – 0.5 % Relamiks (Rel) + 10 % MC;

No 2 – 0.5 % Rel + 1.0 % UDMC;

No 3 – 1.0 % Rel + 1.0 % UDMC (P5);

No 4 – 0.5 % Rel + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS;

No 5 – 1.0 % Rel + 1.0 % UDMC + 0.5 % SS + 0.25 % AS (P5)

Исследования свойств «рядового» по прочности бетона ($f_{cm,28} \sim (40-70)$ МПа, класс по прочности на сжатие С 25/30–С 45/55) показали, что за счет комплексного влияния веществ полифункциональной добавки на пластические свойства бетонной смеси (с сохранением равноподвижности при снижении водосодержания) и на формирование (уплотнение и упрочнение) структуры цементного камня и бетона прочность в нормально-влажностных условиях твердения повышается за первые 24 ч на 50–80 % и к проектному (28 сут.) возрасту – на 40–60 %, что позволяет на 10–15 % снизить расход цемента. При твердении с начальным разогревом бетона до $t \sim (40-45)^\circ\text{C}$ и последующим выдерживанием в условиях «термоса» (при медленном – до $2^\circ\text{C}/\text{ч}$ – остывании среды в тепловом агрегате) прочность за 12–16 ч достигает уровня 70–90 % от проектной (при больших значениях для бетона из жестких смесей), что обеспечивает снижение в 1,5–2 раза энергозатрат на тепловую обработку изделий.

Одновременно с повышением прочности бетона снижается его водопоглощение ($\leq 2,0$ %), растет водонепроницаемость (до марки W20) и морозостойкость (до марки F500). В соот-

ветствии с увеличением непроницаемости бетона обеспечивается высокая степень защиты стальной арматуры, определенная экспериментальным электрохимическим методом контроля (по СТБ 1168–99).

ВЫВОДЫ

1. Разработаны теоретические и экспериментальные аспекты получения новой полифункциональной добавки в бетон, обеспечивающей повышение темпа и уровня его прочности в проектном возрасте до 40–60 % при одновременном снижении энергетических затрат на ускорение процесса твердения в 1,5–2 раза.

2. Экспериментально обоснованы рациональное соотношение компонентов разработанной полифункциональной добавки и ее влияние на кинетику твердения цементного бетона, а результатами дериватографического и рентгенофазового анализов показано, что этот эффект базируется на образовании в цементном камне мелкокристаллической формы кристаллогидратов силикатной группы CSH, дополняющей традиционно формирующиеся при реакции трех- и двухкальциевого силиката с водой – C_2SH , а также на увеличении количества новообразований за счет реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с аморфным SiO_2 и эттрингита $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, образующегося за счет реакций с алюминатами вещества ускоряюще-уплотняющего компонента добавки. В бетоне эффект дополняется упрочнением зоны контакта поверхности заполнителя с цементным камнем за счет реакции между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и SiO_2 , что подтверждено ростом (до 38 %) химически связанной воды цементом в присутствии полифункциональной добавки.

3. Имеет практическую значимость экспериментально подтвержденное равенство эффекта по влиянию на прочность бетона традиционно применяемого микрокремнезема с дозировкой в бетон 10 % и более от массы цемента и ультрадисперсного микрокремнезема в дозировке 1,0 % от массы цемента. При этом существенно упрощается технология приготовления бетона, поскольку ультрадисперсный микрокремнезем можно вводить в бетон как индивидуально с водой затворения, так и в составе разработанной полифункциональной добавки.

4. Результаты экспериментальных исследований подтверждены опытно-производственной апробацией на КУП «Управление дорожно-

мостового строительства и благоустройства Мингорисполкома» (г. Минск) и на Заводе железобетонных мостовых конструкций ОАО «Дорстройиндустрия» (г. Фаниполь).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуриненко, Н. С. Основы эффективности ультрадисперсного микрокремнезема в цементном бетоне / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батыновский // Проблемы современного строительства: сб. науч.-техн. статей, материалы науч.-техн. конф., Минск, 30 мая 2018 г. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: В. Ф. Зверев [и др.]. Минск, 2018. Ч. 2. С. 256–264.
2. Гуриненко, Н. С. Об эффективности применения в цементном камне и бетоне полифункциональной добавки с ультрадисперсным микрокремнеземом / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батыновский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сб. науч. статей XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25–26 окт. 2018 г.: в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. Брест, 2018. Ч. 2. С. 14–22.
3. Бибик, М. С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы «Термохрон» / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2010. № 4. С. 23–26.
4. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер. с англ. / Х. Тейлор. М.: Мир, 1996. 500 с.
5. Чистяков, В. В. Интенсификация твердения бетона / В. В. Чистяков, Ю. М. Дорошенко, И. Г. Гранковский; под ред. А. А. Пашенко. Киев: Будівельник, 1988. 118 с.
6. Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С. С. Каприелов, В. Г. Батраков, А. В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. 1999. № 6. – С. 6–10.
7. Effects of the Chemical Structure on the Properties of Polycarboxylate-Type Superplasticizer / K. Yamada [et al.] // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30, No 2. P. 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00230-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00230-6).
8. Калашников, В. И. Самоуплотняющийся высокопрочный бетон / В. И. Калашников // Современные бетоны: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф., Запорожье, 1–3 июня 2007 г. / ООО «Будиндустрия ЛТД»; под общ. ред. А. В. Ушеров-Маршака [и др.]. Запорожье, 2007. С. 30–40.
9. Чернышов, Е. М. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема / Е. М. Чернышов, Д. Н. Коротких // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI в. 2008. № 5. С. 30–32.
10. Батыновский, Э. И. Особенности технологии бетона прочностью 100–150 МПа с углеродными наноматериалами / Э. И. Батыновский, В. Д. Якимович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника. 2012. № 2. С. 59–67.

REFERENCES

1. Gurinenko N. S., Batyanovskii E. I. (2018) Fundamentals of Efficiency for Ultra-Disperse Micro-Silica in Cement Concrete *Problemy Sovremennogo Stroitel'stva: Sb. Nauch.-Tekhn. St., Materialy Nauch.-Tekhnich. Konf., Minsk, 30 Maya 2018 g. Ch. 2* [Problems of Modern Construction: Collection of Scientific and Technical Papers, Proceedings of Scientific and Technical Conference, Minsk, May 30, 2018. Part 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 256–264 (in Russian).
2. Gurinenko N. S., Batyanovskii E. I. (2018) On Efficient Application of Polyfunctional Additive with Ultra-Disperse Micro-Silica in Cement Stone and Concrete. *Perspektivnye Napravleniya Innovatsionnogo Razvitiya Stroitel'stva i Podgotovki Inzhenernykh Kadrov: Sb. Nauch. St. XXI Mezhdunar. Nauch.-Metod. Seminara, Brest, 25–26 Okt. 2018 g. Ch. 2* [Prospective Directions in Innovation Development of Construction and Training of Engineering Personnel: Collection of research Papers of XXI International Scientific and Methodological Workshop, Brest, Oct. 25–26, 2018. Part 2]. Brest, Brest State Technical University, 14–22 (in Russian).
3. Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) Evaluation of Kinetics in Hardening of Cement Stone while Using Heat-Sensing Device of “Termokhron” System. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (4), 23–26 (in Russian).
4. Taylor H. (1997) *Cement Chemistry*. Thomas Telford. 459. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>.
5. Chistyakov V. V., Doroshenko Yu. M., Grankovskii I. G. (1988) *Intensification of Concrete Hardening*. Kiev, Budivelnik Publ. 118 (in Russian).
6. Kaprielov S. S., Batrakov V. G., Sheynfeld A. V. (1999) Modified Concrete of New Generation: Reality and Prospects. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (6), 6–10 (in Russian).
7. Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M. (2000) Effects of the Chemical Structure on the Properties of Polycarboxylate-Type Superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 30 (2), 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00230-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00230-6).
8. Kalashnikov V. I. (2007) Self-Compacting and High-Strength Concrete. *Sovremennye Betony: Sb. Tr. IX Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Zaporozh'e, 1–3 Iyunya 2007 g.* [Modern Concrete: Collection of Papers of IX International Scientific and Practical Conference, Zaporozhie, June 1–3, 2007]. Zaporozhie, 30–40 (in Russian).
9. Cernyshov E. M., Korotkikh D. N. (2008) Modification of Cement Stone Structure by Micro- and Nano-Particles of Silica. *Stroitelnye Materialy, Oborudovanie i Tekhnologii XXI Veka* [Construction Materials, Equipment and Technologies of the XXI Century], (5), 30–32 (in Russian).
10. Batyanovskii E. I., Yakimovich V. D., Ryabchikov P. V. (2012) Specific Features of Technology for Concrete of 100–150 MPa Strength with Carbon Nano-Materials. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (2), 59–67 (in Russian).

Поступила 17.04.2019

Подписана в печать 25.06.2019

Опубликована онлайн 31.07.2019

Received: 17.04.2019

Accepted: 25.06.2019

Published online: 31.07.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-339-349>

УДК 004.42

Автоматизированная система управления обучением CATS

Канд. техн. наук, доц. Ю. Б. Попова¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Использование информационных технологий, в частности информационных обучающих систем, увеличивает возможности как преподавателя, так и обучаемого в достижении своих целей в образовательном процессе, учитывая индивидуальные характеристики каждого и предоставляя возможности непрерывного образования. В статье предлагается и рассматривается новая автоматизированная система управления обучением, получившая название CATS (Care About the Students). Данная система покрывает все составляющие компоненты учебного процесса, позволяет вести электронный журнал посещения и защиты лабораторных работ, распределять темы и контролировать ход курсового и дипломного проектирования (создавая при этом автоматически листы заданий с последующим экспортом в редактор MS Word), проводить тестирование знаний студентов в режимах контроля и самообучения, формировать электронные учебно-методические комплексы, информировать студентов о темах лекционных и практических занятий с возможностью скачивания соответствующих материалов, предоставлять учебный контент в формате SCORM, разработанный преподавателями всего мира. Работая в системе CATS, можно обмениваться сообщениями со студентами и преподавателями, наблюдать за успеваемостью и процессом изучения предлагаемого материала студентами, проверять выполненные задания на плагиат. Рассматриваемая система также учитывает специфику обучения в техническом вузе, предусматривая работу со встроенной системой управления проектами и возможностью документирования ошибок. Автоматизированная система CATS реализована в виде веб-приложения с использованием современных технологий и доступна в локальной сети всего университета по адресу [172.16.11.72:2020].

Ключевые слова: LMS, электронное обучение, обучающая система, автоматизация обучения, мониторинг процесса обучения, тесты для контроля знаний и самообучения

Для цитирования: Попова, Ю. Б. Автоматизированная система управления обучением CATS / Ю. Б. Попова // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 339–349. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-339-349>

Learning Management System CATS

Yu. B. Popova¹⁾

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

Abstract. The use of information technologies and, in particular, information training systems increases capacity of both a teacher and a student to achieve their goals in an educational process, taking into account individual characteristics of each and providing opportunities for continuing education. The paper proposes and considers a new automated learning management system, called CATS (Care About the Students). The proposed system covers all components of the educational process, allows to conduct an electronic journal of visiting and defending laboratory works, distribute topics and monitor progress

Адрес для переписки

Попова Юлия Борисовна
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

Address for correspondence

Popova Yuliya B.
Belarusian National Technical University
9 B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

of course and diploma projects (creating automatically task sheets with subsequent export to MS Word editor). The CATS LMS makes it possible to test students' knowledge in control and self-education modes, to form electronic educational and methodical complexes, to inform students about topics of lecture and practical classes with the possibility of downloading relevant materials, to provide educational content in SCORM format, developed by teachers around the world. Working in the CATS system, it is possible to exchange messages with students and teachers, to monitor progress and process of studying in respect of the proposed material by students, to check accomplished assignments of students for plagiarism. The system under consideration also takes into account specificity of training at a technical higher education institution, providing for work with an integrated project management system and ability to submit bugs. The CATS LMS has been implemented as a web application using modern technologies and it is available in the local network within the whole university at [172.16.11.72:2020].

Keywords: LMS, e-learning, training system, learning automation, monitoring of learning process, tests for knowledge control and self-learning

For citation: Popova Yu. B. (2019) Learning Management System CATS. *Science and Technique*. 18 (4), 339–349. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-339-349> (in Russian)

Введение

На сегодняшний день электронное обучение используется повсеместно, реализуя тенденцию непрерывного образования. Например, в США уже более 90 % вузов и школ, а также компаний, имеющих численность более тысячи человек, используют эту форму обучения [1]. К основным преимуществам электронного обучения относятся:

- экономия времени, поскольку у участников процесса отсутствует необходимость присутствовать очно на лекциях и тестах, добираться до места их проведения. По данным маркетингового агентства Cedar Group (CG), время на процесс обучения уменьшается на 35–45 %;
- сокращение затрат вследствие их оптимизации при переезде сотрудников, проживании, аренде залов и оплате расходов бизнес-тренеров. По данным CG, стоимость услуги электронного обучения дешевле прочих форм образования на 32–45 %;
- возможность обучения вне зависимости от наличия преподавателя;
- обучение в своем темпе в любое удобное время;
- увеличение скорости запоминания учебного материала на 15–25 % по сравнению с очной формой обучения;
- легкость актуализации учебного материала и возможность его просмотра неограниченное количество раз;
- прозрачность процесса обучения и быстрая доступность статистики для анализа прогресса.

Имеющиеся доказательные преимущества электронного обучения привели к стремительному росту капиталовложений в это направ-

ление. По оценке компании MarketsandMarkets (США), занимающейся глобальными экономическими исследованиями и консалтингом, ожидается рост рынка систем обучения с 5,22 млрд дол. в 2016 г. до 15,72 млрд дол. к 2021 г. [2].

Сравнительный анализ имеющихся систем

Наличие спроса на системы управления обучением (англ. Learning Management System, LMS), естественно, рождает множество предложений, создавая проблему выбора наилучшей. Классификация таких систем, а также их сравнительный анализ приведены в [3]. По данным команды Edutechnica, самыми распространенными в мире являются Blackboard, Moodle и Sakai [4]. Вследствие специфики системы образования, отличающегося от более индивидуального западного, а также по стоимостным характеристикам, в высших учебных заведениях Республики Беларусь наибольшее распространение получили системы Moodle, «Прометей», e-University (нынешнее название e-Uni) и SharePoint LMS.

Moodle (англ., Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment), известная как виртуальная обучающая среда или как средство создания динамических веб-сайтов для учащихся [5], ориентирована, прежде всего, на организацию взаимодействия между преподавателем и учениками, подходит для организации традиционных дистанционных курсов и поддержки очного обучения. LMS Moodle – свободно распространяемый программный продукт с открытым исходным кодом. Этот факт одновременно является и преимуществом этой

системы, и ее недостатком, поскольку, с одной стороны, позволяет создавать любые учебные курсы и занятия, а с другой – требует особых знаний в их разработке. Вследствие чего системе довольно сложно настроить, а преподавателю, не владеющему основами программирования, не просто разобраться. Для обучения работе с Moodle даже существуют учебники, что еще раз подчеркивает нелегкость в ее освоении. Также следует отметить недружественный интерфейс системы, перегруженность ссылками и множество лишней информации.

LMS «Прометей» является российской разработкой и позволяет организовать учебные курсы, учебные материалы, тесты с 10 видами вопросов, чат, форум, сообщения и многое др. К сожалению, в системе не предусмотрена возможность поддержки курсового и дипломного проектирования, а также отсутствует адаптивность обучения к текущим знаниям студента и его психофизиологическим особенностям.

LMS e-University реализована белорусскими разработчиками и внедрена на нескольких факультетах БГУ [6]. В системе предусмотрено создание учебных курсов и тестов по ним. Однако вследствие того, что система уже не поддерживается разработчиком, ее интерфейс и набор функциональности значительно устарели. В настоящее время на замену этому программному продукту вышла система e-Uni, более ориентированная на корпоративный сектор.

SharePoint – это коллекция программных продуктов и компонентов от компании Microsoft для разработки сайтов. Таким образом, разработка LMS с использованием данных продуктов требует отдельных навыков и умений, которыми преподаватели вряд ли обладают. Этим моментом воспользовались некоторые разработчики сайтов и предлагают свои услуги с использованием SharePoint. Поэтому полнота функциональности разработанных таким образом LMS будет зависеть от фантазии разработчика, а легкость настройки – от его мастерства.

Следует также добавить, что описанные выше системы «Прометей», e-University и SharePoint LMS являются платными разработками и обладают одинаковыми недостатками:

высокой стоимостью и отсутствием гибкости, т. е. купленный продукт – это «вещь в себе» и не подлежит самостоятельной модификации, а лишь за дополнительную оплату.

Принимая во внимание недостатки имеющихся платных и бесплатных систем управления обучением, а также желая учесть собственную специфику, многие учебные заведения прибегают к самостоятельной разработке таких автоматизированных систем либо делают индивидуальный заказ на разработку. Так поступили, например в Harvard University и Massachusetts Institute of Technology (США), в Российском экономическом университете имени Г. В. Плеханова, в Высшей школе экономики (НИУ ВШЭ, Россия), в Первом Санкт-Петербургском государственном медицинском университете имени академика И. П. Павлова и во многих др. Можно отметить, что в последнее время наметилась тенденция на такие заказы, поскольку готовые системы, хотя и претендуют на термин «универсальность», но не всегда его реализуют.

Руководствуясь указанными выше преимуществами электронного обучения и наметившимися тенденциями в нем, на кафедре программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем (ПОВТиАС) ФИТР БНТУ с 2009 г. идут разработка, использование и постоянное совершенствование собственной системы управления учебным процессом [7]. В настоящее время актуальна уже третья версия системы, размещенная на сервере кафедры и доступная в локальной сети БНТУ по адресу [172.16.11.72:2020]. Данная версия системы получила название CATS (англ., Care About the Students) по результатам проведенного среди студентов кафедры конкурса на лучшее название.

Описание предлагаемой разработки

Проект CATS является автоматизированной системой управления учебным процессом и предназначен для повышения качества подготовки специалистов дневной, заочной, дистанционной форм обучения, а также для самостоятельной работы. Использование в проекте информационных технологий, средств мультимедиа и телекоммуникаций улучшает динамику

и содержательность учебных заданий, процесс их выполнения, контроль, оценку и успешность обучения. LMS CATS реализована в виде веб-приложения с трехуровневой архитектурой. По сравнению с двухзвенной клиент-серверной или файл-серверной архитектурой такой подход обеспечивает большую масштабируемость (за счет горизонтальной масштабируемости сервера приложений и мультимплексирования соединений) и большую гибкость (за счет изолированности уровней друг от друга). Диаграмма развертывания веб-приложения представлена на рис. 1. Сервер баз данных (БД) представляет собой слой данных, обеспечивает их хранение, вынесен на отдельный уровень, реализован средствами системы управления базой данных Microsoft SQL Server. Подключение к этому компоненту возможно только с уровня сервера приложений, обеспечивающего организацию взаимодействия клиентов и сервера БД. Сервер приложений (WEB-сервер) представляет собой связующий слой, на нем сосредоточена большая часть бизнес-логики. Вне его остаются только фрагменты, экспортируемые на клиента (терминалы), а также элементы логики, погруженные в базу данных (хранимые процедуры и триггеры).

Реализация данного компонента обеспечивается связующим программным обеспечением ASP.NET MVC. Слой клиента – это интерфейсный компонент комплекса (приложение AngularJS), предоставляемый конечному пользователю через WEB-браузер. Этот уровень не имеет прямых связей с базой данных (по требованиям безопасности и масштабируемости),

не нагружен основной бизнес-логикой (по требованиям масштабируемости) и хранит состояние приложения (по требованиям надежности). На этот уровень вынесена только простейшая бизнес-логика: интерфейс авторизации, алгоритмы шифрования, проверка вводимых значений на допустимость и соответствие формату, несложные операции с данными (сортировка, группировка, подсчет значений), уже загруженными на терминал. Состав программных модулей клиентской части приведен на рис. 2, из которого следует, что в предлагаемой разработке кроме стандартного набора программных модулей, характерного для большинства LMS, присутствуют уникальные модули для управления процессами дипломного и курсового проектирования (без которых обучение в вузе невозможно), модуль для управления проектами (что обязательно при подготовке инженеров-программистов, поскольку каждый программный продукт подвергается тестированию), модуль для составления электронных учебно-методических комплексов (ЭУМК) с возможностью мониторинга его изучения студентами, а также модуль для миграции контента из других LMS по стандарту SCORM (англ., Sharable Content Object Reference Model) [8].

С точки зрения функциональных возможностей, предлагаемая автоматизированная система поддерживает работу в четырех ролях: администратор, преподаватель, студент и наблюдатель. Рассмотрим более подробно возможности работы в каждой роли, принимая во внимание, что первые три подлежат аутентификации (рис. 3).

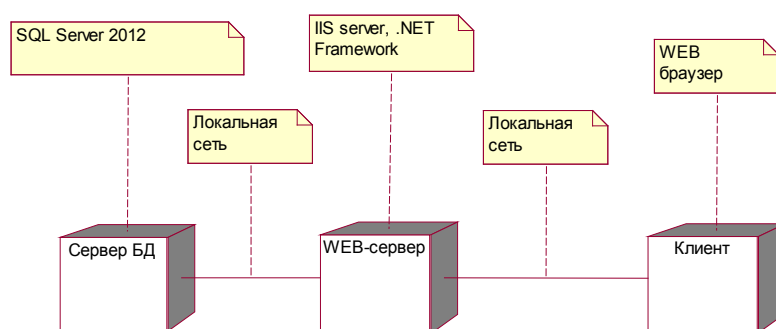


Рис. 1. Диаграмма развертывания LMS CATS

Fig. 1. CATS LMS deployment chart

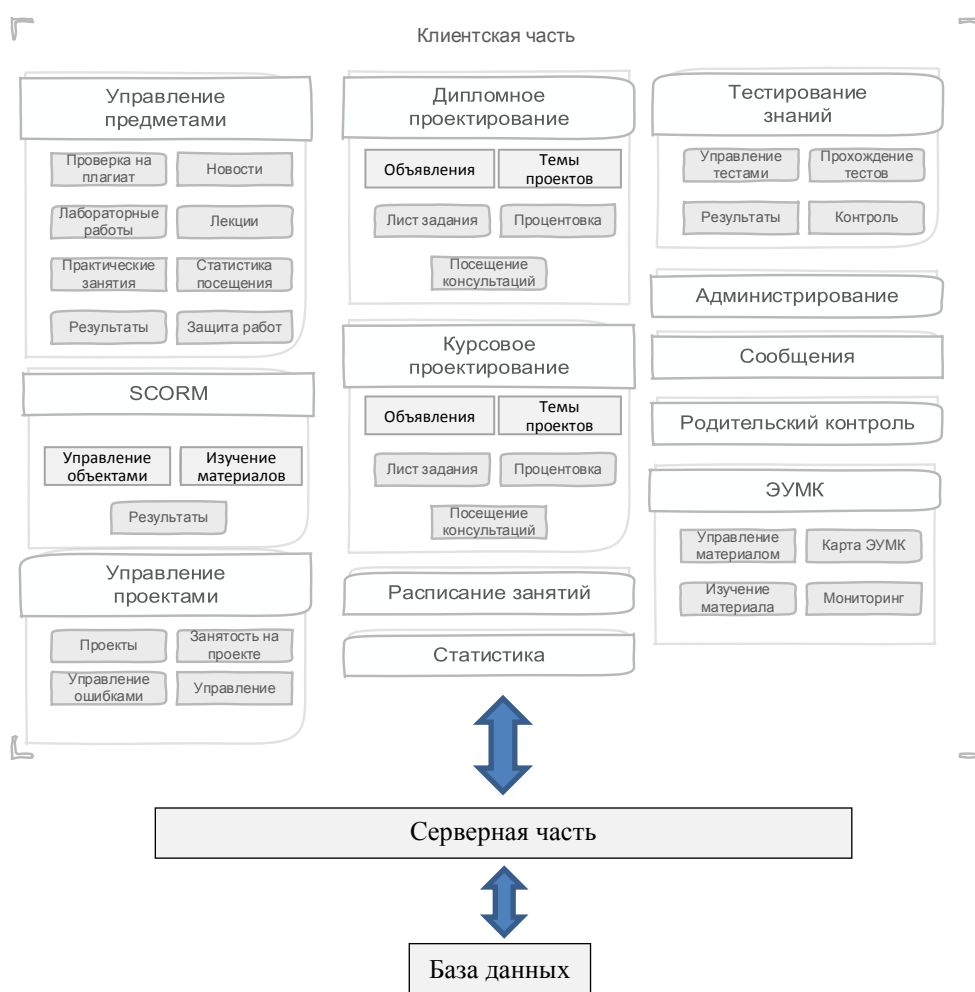


Рис. 2. Программные модули клиентской части LMS CATS

Fig. 2. Software modules of CATS LMS client part

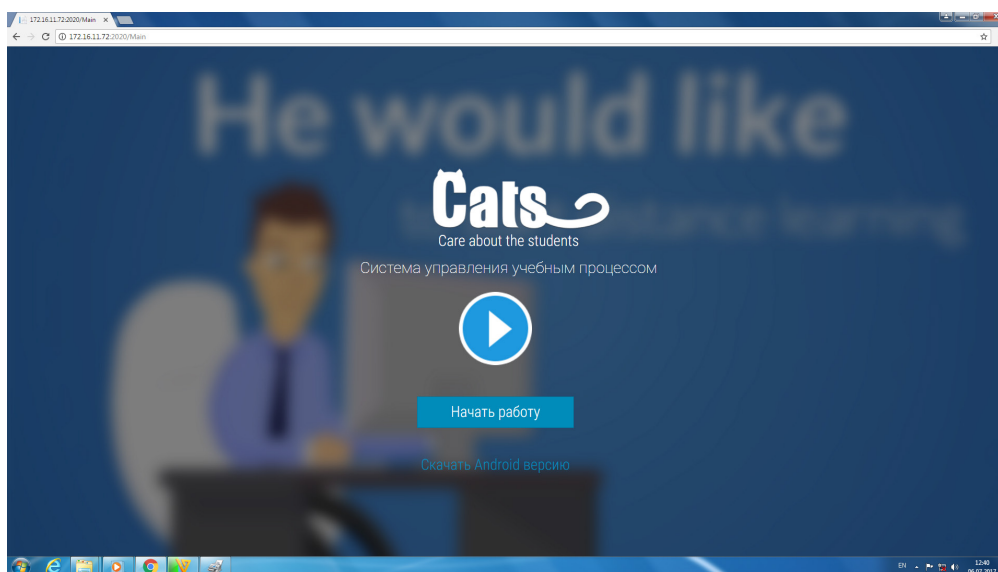


Рис. 3. Стартовая страница LMS CATS

Fig. 3. CATS LMS start page

Для администратора системы доступны следующие функциональные возможности:

- создание/редактирование/удаление студенческих групп, преподавателей, студентов;
- сброс пароля пользователям (данная функциональность необходима для случаев, когда пользователь системы забыл свой пароль доступа);
- обмен сообщениями с пользователями;
- поиск, сортировка пользователей;
- просмотр статистики посещения системы пользователями (данная функциональность позволяет отслеживать дату и время аутентификации в систему студентов и преподавателей).

В роли преподавателя возможны такие функциональности, как:

- создание/редактирование/удаление предметов;
- формирование предмета из предлагаемых блоков: новости, лекции, практические занятия, лабораторные работы, хранилище файлов с учебными материалами для скачивания, курсовые проекты, тестирование знаний, ЭУМК;
- прикрепление групп к предметам, разделение студентов на подгруппы (если требуется для лабораторных работ);
- организация проведения лекционных и практических занятий с прикреплением заданий и требуемых материалов, ведением электронного журнала, формированием графика защиты работ, расчета рейтинговой оценки по предмету (рис. 4);

– проверка присланных работ на плагиат, вследствие сравнения их с работами, хранящимися в архиве текущего и прошлых семестров [9]. В LMS CATS поиск заимствованных работ реализован как для каждой отдельной присланной работы обучающегося, так и для всей группы сразу посредством применения кластерного анализа текстовой информации (рис. 5);

– формирование тестов для контроля и самоконтроля знаний студентов (предусмотрены вопросы, имеющие один правильный вариант ответа, несколько правильных вариантов ответа, вопросы на последовательность и ввод правильного ответа с клавиатуры), организация проведения автоматизированного тестирования, ведение статистики результатов пройденных тестов;

– организация курсового и дипломного проектирования, назначение/подтверждение тем проектов, автоматическая генерация листов заданий к проектам с последующим экспортом в редактор MS Word, формирование графиков консультаций и процентов выполнения;

– использование SCO-объектов, созданных по технологии SCORM в других системах управления обучением [8];

– создание ЭУМК с автоматическим формированием учебной карты и возможностью вставки графической информации, аудио, видео, анимации, а также со встроенным модулем для мониторинга процесса изучения предлагаемого материала студентами (рис. 6) [10];

№	Студент	ЛР№1	ЛР№2	ЛР№3	ЛР№4	ЛР№5	ЛР№6	ЛР№7	Средний балл	Средний балл за тесты	Рейтинговая оценка
1	Понякин Карина Васильевна	9	8	8	9	9	9	10	8.9	7.3	8.1
2	Маринкина Марина Юрьевна	8	6	7	6	8	8	9	7.4	6.2	6.8
3	Морозов Дмитрий Юрьевич	8	8	9	9	10	9	10	9	7.8	8.4
4	Некрасов Вадим Юрьевич	6	2	4	5	7	6	7	5.3	8	6.7
5	Носов Александр Владимирович	6	7	2	6	6	6	9	6	6.3	6.2
6	Осипов Денис Андреевич	7	6	6	6	8	9	9	7.3	6.7	7.6
7	Скрябин Алексей Сергеевич	6	7	6	6	8	6	7	6.6	4.5	5.5
8	Харчев Александр Олегович	9	8	8	8	8	9	9	8.4	8	8.2
9	Харчев Александр Александрович	9	8	7	6	8	8	9	7.9	7.3	7.6
10	Иванов Алексей Сергеевич	6	6	6	7	4	8	9	6.6	7	6.8
11	Никитин Юрий Владимирович	5	1	2	4	6	8	10	5	5.7	5.3

Рис. 4. Страница электронного журнала по дисциплине «Тестирование и отладка программного обеспечения» в LMS CATS

Fig. 4. Page of electronic journal on discipline "Testing and Debugging of Software" in CATS LMS

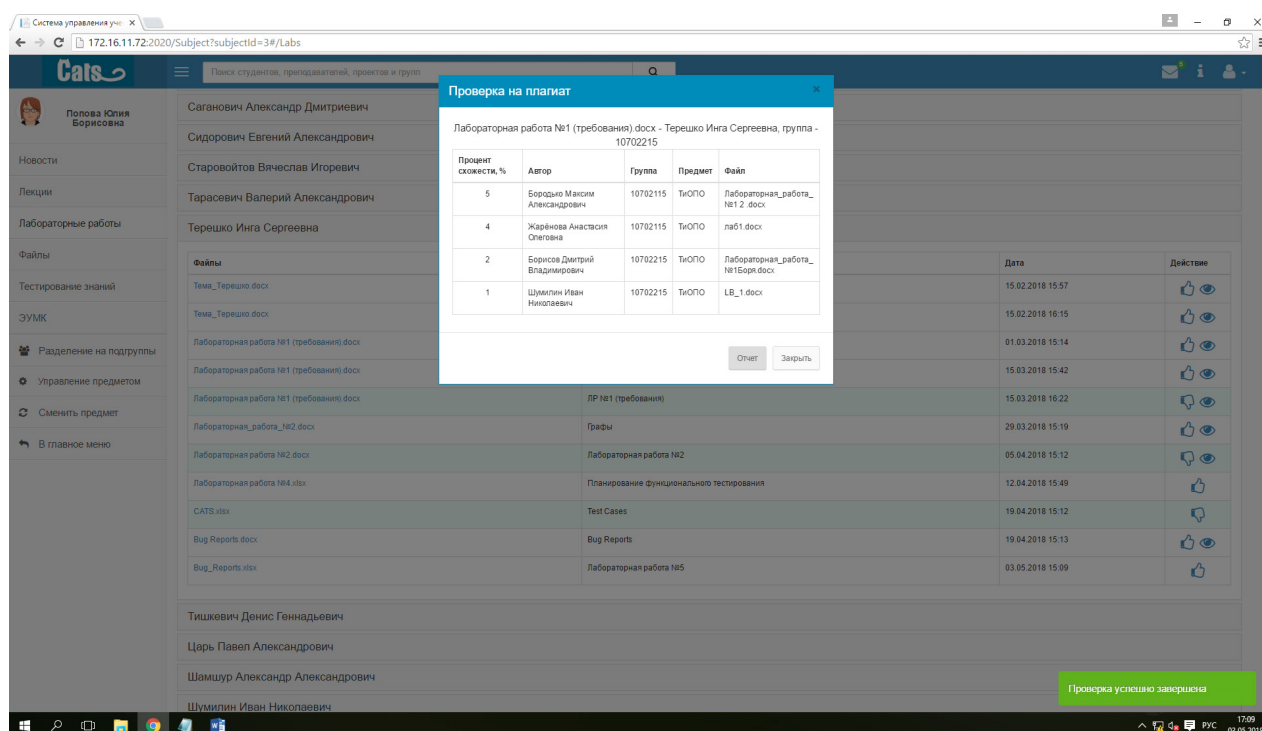


Рис. 5. Страница результатов проверки лабораторной работы на плагиат в LMS CATS

Fig. 5. Page of checking results for laboratory work on plagiarism in CATS LMS

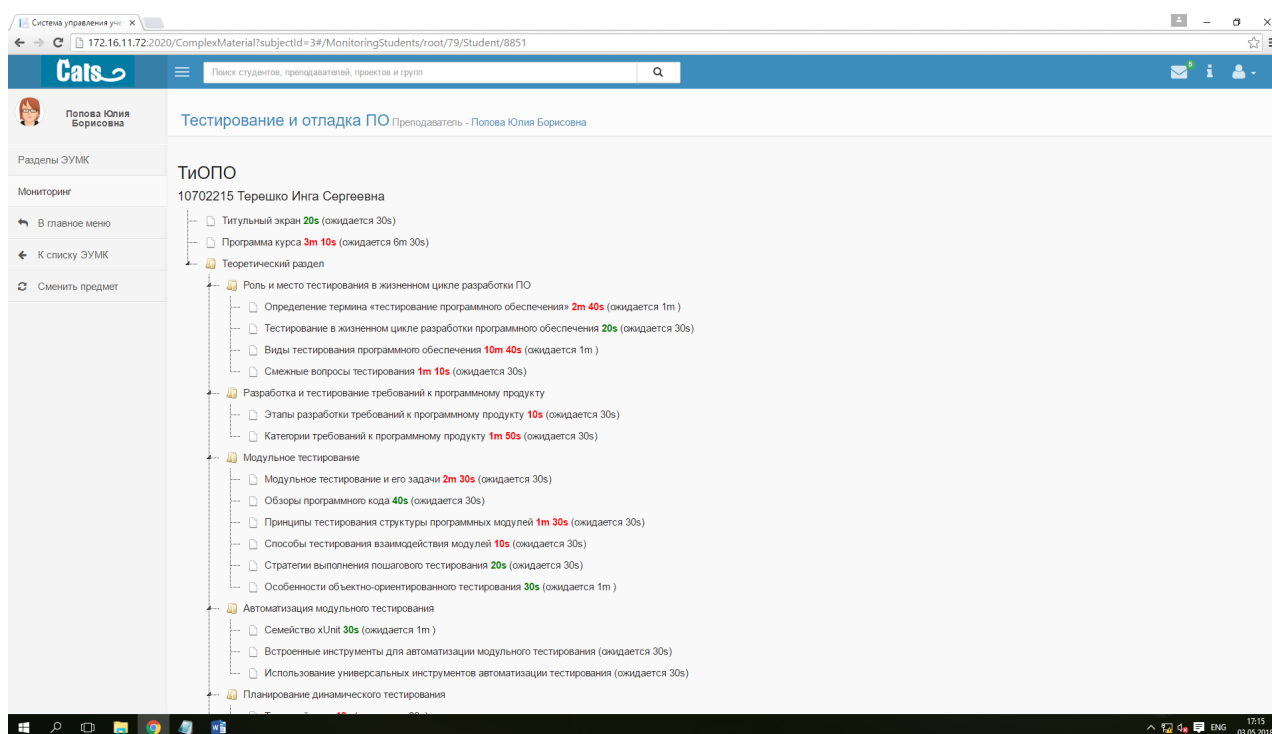


Рис. 6. Страница мониторинга изучения электронных учебно-методических комплексов по дисциплине «Тестирование и отладка программного обеспечения» в LMS CATS

Fig. 6. Monitoring page of educational and methodical complex study on discipline “Testing and Debugging Software” in CATS LMS

– обмен сообщениями с пользователями системы (администратором, преподавателями и студентами);

– организация работы в системе документирования и отслеживания ошибок при разработке программного обеспечения (создание/редактирование/удаление проектов, закрепление за ними разработчиков и тестирующих, составление отчетов о найденных ошибках в тестируемых программах, изменение статусов ошибок). Данная функциональность предназначена для подготовки студентов-программистов.

В роли студента доступен следующий набор функциональностей:

– просмотр/скачивание всей предоставленной информации (расписание занятий, новости и задания по учебным дисциплинам) (рис. 7);

– изучение учебно-методических материалов в ЭУМК;

– прохождение тестов для контроля знаний и самообучения (рис. 8);

– отправление отчетов по лабораторным и практическим работам на защиту;

– выбор тем для курсового и дипломного проектирования, отслеживание процентов выполнения проектов;

– просмотр SCO-объектов и прохождение встроенных в него тестов;

– обмен сообщениями с преподавателями и администратором;

– документирование и изменение статусов ошибок в BTS, чат по проекту (функциональность используется для подготовки студентов-программистов).

В роли наблюдателя реализована так называемая функциональность «родительский контроль», позволяющая родителям студентов, работникам деканата и кафедры посмотреть интересующую их информацию о результативности учебного процесса: количество пропущенных занятий студентами, количество защищенных работ, оценки за тесты, рейтинговые оценки студентов и др. Для этого не надо проходить авторизацию в системе, а лишь ввести номер интересующей группы (рис. 9).

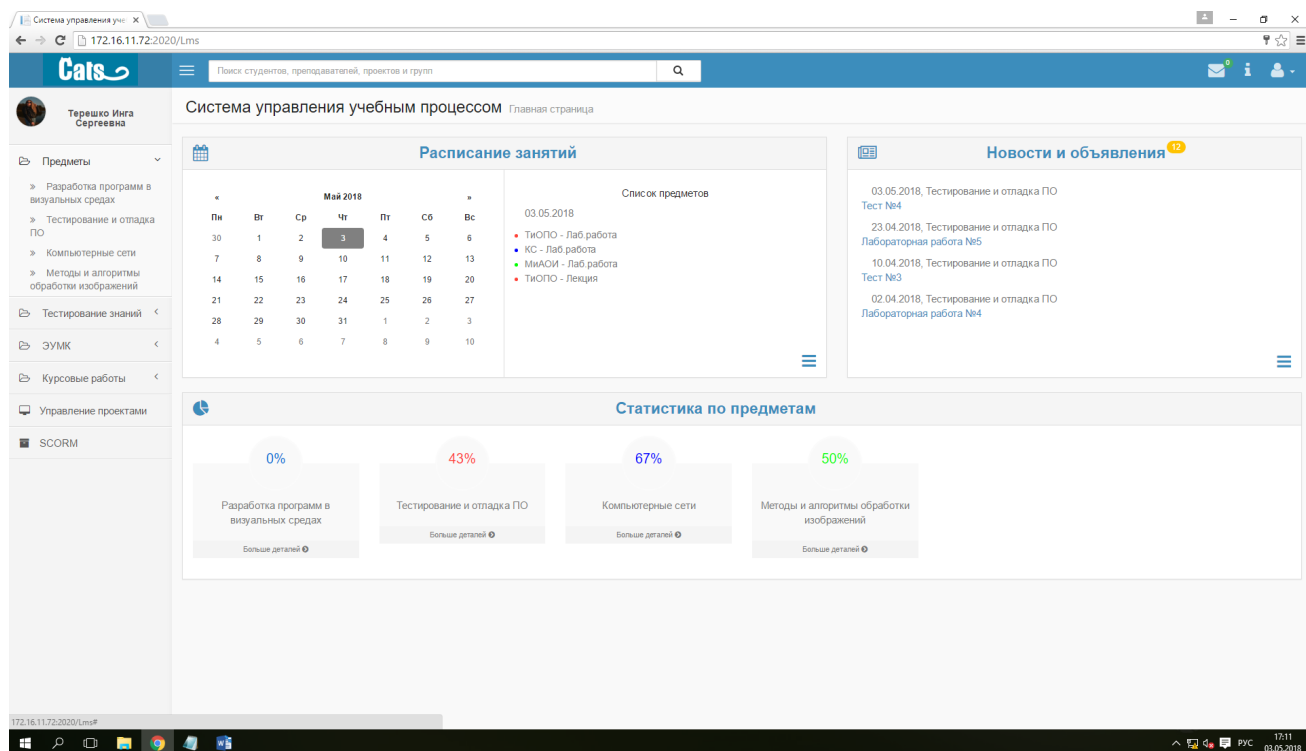


Рис. 7. Главная страница LMS CATS

Fig. 7. CATS LMS home page

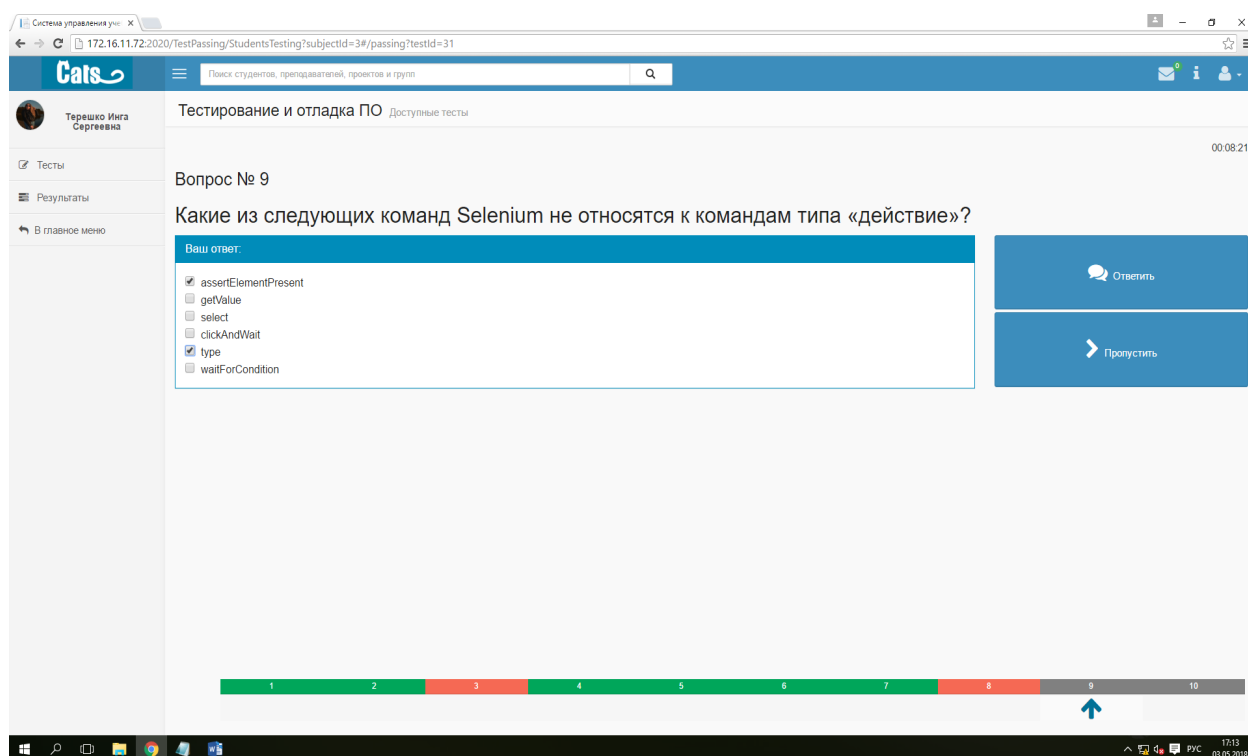


Рис. 8. Прохождение теста в LMS CATS

Fig. 8. Test passing in CATS LMS

Контроль успеваемости

(LMS).Platform Контроль успеваемости Предметы - Статистика 10702115 Выйти

Статистика

Выберите предмет:

Тестирование и отладка ПО

Excel Печать

Группа: 10702115 Предмет: Тестирование и отладка ПО (ТИОПО)

№	ФИО	Пропуски, ч.			Средний балл (кол-во)		
		Лекции	Лабораторные	Всего	Лабораторные	Тесты	Рейтинг
1	Алейникова Екатерина Владимировна	2	4	6	7,67 (3)	6,5	7,085
2	Анастасьев Максим Николаевич	2	4	6	6 (1)	5	5,5
3	Беззубенко Никита Александрович	0	2	2	9 (1)	5,8	7,4
4	Бородюк Максим Александрович	0	4	4	7 (1)	5,3	6,15
5	Жарёнова Анастасия Олеговна	0	2	2	8 (3)	7,2	7,6
6	Здор Вячеслав Александрович	0	8	8	4 (1)	4,5	4,25
7	Кашкин Георгий Александрович	8	20	28	-	4,4	4,4
8	Ковалевский Иван Анатольевич	2	6	8	5 (1)	6	5,5
9	Ковалюх Сергей Александрович	0	6	6	6 (1)	5,3	5,65
10	Козырев Александр Валерьевич	0	6	6	6 (1)	5,5	5,75
11	Кривидий Сергей Валерьевич	6	6	12	5 (1)	4,7	4,85
12	Лавковский Денис Сергеевич	8	12	20	-	3,7	3,7
13	Лебедев Даниель Владимирович	0	0	0	6 (2)	4	5
14	Пилец Мария Александровна	4	6	10	7 (1)	3	5
15	Пятак Алексей Сергеевич	0	2	2	8,33 (3)	8,7	8,515

Рис. 9. Страница результативности процесса обучения в роли наблюдателя в LMS CATS

Fig. 9. Page of learning process effectiveness as observer in CATS LMS

ВЫВОДЫ

1. Имеющаяся в Республике Беларусь ситуация с недостаточным использованием систем управления обучением, с одной стороны, и стремительное их развитие и огромные капиталовложения в западных странах в электронное обучение, с другой, создают перспективную среду для продвижения проекта CATS (Care About the Students), обладающего следующими особенностями:

- LMS CATS покрывает все составляющие компоненты учебного процесса, включая дипломное и курсовое проектирование, что отсутствует практически во всех аналогах;

- учитывает специфику обучения в техническом вузе, предусматривая работу со встроенной системой управления проектами и с возможностью документирования ошибок;

- LMS CATS реализована в виде веб-приложения с использованием современных технологий и доступна в локальной сети всего университета. Для мобильных устройств под управлением операционной системы Android разработана мобильная версия системы;

- предлагаемая система протестирована ручным способом, а также с использованием инструмента автоматизированного тестирования Selenium WebDriver. Каждая новая версия системы подвергается регрессионному тестированию автоматизированными скриптами, а новые функциональности проверяются вручную;

- LMS CATS применяется при изучении большинства дисциплин, преподаваемых на кафедре ПОВТиАС. В системе зарегистрированы 22 преподавателя и 811 студентов;

- предлагаемая система постоянно совершенствуется, обновляется и является площадкой для внедрения новых идей и результатов научных исследований в области принятия решений и искусственного интеллекта. В настоящее время разрабатывается программный модуль для адаптации системы к текущим знаниям обучающегося и его психофизиологическим способностям, что отсутствует во всех известных аналогах;

- LMS CATS создана при участии студентов, что позволяет им практиковаться на реаль-

ном проекте, изучать новые технологии, учиться работе в команде, видеть и гордиться результатами своего труда.

2. В октябре 2015 г. предлагаемая разработка была награждена дипломом «Доступное образование» конкурса App4Education, проведенного в честь 70-летия Организации Объединенных Наций. В мае 2016 г. программный модуль для тестирования знаний студентов был использован во время проведения аккредитации специальности 1-40 05 01 «Информационные системы и технологии» в Белорусском национальном техническом университете. В декабре 2016 г. система LMS CATS (Care About The Students) стала финалистом Республиканского конкурса молодежных инновационных проектов «Информационные и мобильные технологии для образовательного процесса», проводимом Министерством образования Республики Беларусь и компанией МТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор мирового и российского рынка электронного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ra-kurs.spb.ru/2/0/2/1/?id=42>. Дата доступа: 20.03.2018.
2. Learning Management System Market [Electronic Resource]. Mode of access: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/learning-management-systems-market-1266.html>. Date of access: 21.03.2018.
3. Попова, Ю. Б. Классификация автоматизированных систем управления обучением / Ю. Б. Попова // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 2. С. 51–58.
4. Данные о LMS в вузах США, Австралии, Канады и Великобритании [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://education-events.ru/2014/09/26/edutechnica-published-data-about-lms-usage/>. Дата доступа: 10.02.2018.
5. Система управления курсами Moodle [Электронный ресурс] // Официальный сайт Moodle moodle.org. Режим доступа: <https://moodle.org/about/>. Дата доступа: 20.03.2018.
6. Сетевая образовательная платформа e-University [Электронный ресурс] // Официальный сайт ЦП «IBA» belarus.iba.by Режим доступа: http://belarus.iba.by/iba_web/main.nsf/products/ru.software.euniversity.html. Дата доступа: 10.02.2018.
7. Попова, Ю. Б. Автоматизированная система поддержки учебного процесса в вузе / Ю. Б. Попова, В. В. Яцынович // Информатизация образования-2010: педагогические аспекты создания информационно-образовательной среды: материалы Междунар. науч. конф., 27–30 окт. 2010 г. Минск: БГУ, 2010. С. 400–404.

8. Попова, Ю. Б. Программная реализация миграции контента по стандарту SCORM в системе управления обучением / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 1. С. 86–97.
 9. Попова, Ю. Б. Алгоритмическая и программная реализация определения плагиата в системах управления обучением / Ю. Б. Попова, А. С. Голобурда // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 1. С. 71–78.
 10. Попова, Ю. Б. Автоматизация мониторинга изучения учебных материалов студентами / Ю. Б. Попова, С. А. Левшунов // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / ред. кол.: А. М. Маляревич (гл. ред.) [и др.]. Минск: Бизнесофсет, 2018. С. 83–84.
- Поступила 07.05.2017
 Подписана в печать 10.07.2018
 Опубликовано онлайн 31.07.2019
- ### REFERENCES
1. *Review of World and Russian Market of e-Learning*. Available at: <http://www.ra-kurs.spb.ru/2/0/2/1/?id=42>. (Accessed 20 March 2018) (in Russian).
 2. *Learning Management System Market*. Available at: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/learning-management-systems-market-1266.html>. (Accessed 21 March 2018).
 3. Popova Yu. B. (2016) Classification of Automated Systems for Training Control. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (2), 51–58 (in Russian).
 4. *Data on LMS at High Education Institutions of USA, Australia, Canada and UK*. Available at: <http://education-events.ru/2014/09/26/edutechnica-published-data-about-lms-usage>. (Accessed 10 February 2018) (in Russian).
 5. *Moodle-Course Control System*. Available at: <https://moodle.org/about/>. (Accessed 20 March 2018) (in Russian).
 6. *Network Educational e-University-Platform*. Available at: http://belarus.iba.by/iba_web/main.nsf/products/ru.software.euniversity.html. (Accessed 10 February 2018) (in Russian).
 7. Popova Yu. B., Yatsynovich V. V. (2010) Automated System for Maintaining Training Process at Higher Education Institutions. *Informatizatsiya Obrazovaniya-2010: Pedagogicheskie Aspekty Sozdaniya Informatsionno-Obrazovatel'noi Sredy: Materialy Mezhdunar. Nauch. Konf., 27–30 Okt. 2010 g.* [Informatization in Education-2010: Pedagogical Aspects for Creation of Information and Educational Environment: Proceedings of International Scientific Conference, Oct. 27–30, 2010]. Minsk, Belarusian State University, 400–404 (in Russian).
 8. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2016) Program Realization of Content Migration According to SCORM-Standard in Training Control System. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (1), 86–97 (in Russian).
 9. Popova Yu. B., Goloburda A. S. (2017) Algorithmic and Program Realization for Determination of Plagiarism in Training Control System. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (1), 71–78 (in Russian).
 10. Popova Yu. B., Levshunov S. A. (2018) Automation of Monitoring for Study of Students' Training Materials. *Innovatsionnye Tekhnologii, Avtomatizatsiya i Mekhatronika v Mashino- i Priborostroenii: Materialy VI Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Innovative Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical Engineering and Instrumentation: Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference]. Minsk, Biznesofset Publ., 83–84 (in Russian).

Received: 07.05.2017

Accepted: 10.07.2018

Published online: 31.07.2019

Управление мехатронной системой на базе многозвенных роботов-манипуляторов

Кандидаты техн. наук, доценты Н. Н. Гурский¹⁾, Ю. А. Скудняков²⁾,
инж. В. С. Артюшич¹⁾, асп. А. Н. Безручко¹⁾

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

²⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассматривается задача управления многозвенными роботами-манипуляторами для реализации высокотехнологических процессов в промышленности. Излагаются последовательные шаги использования компьютерных технологий при построении роботов-манипуляторов, включающие математические, алгоритмические и аппаратно-программные средства для создания многоприводной мехатронной системы под управлением промышленного микроконтроллера фирмы OMRON. Приведена кинематическая схема робота-манипулятора, совершающего два типа движений – поворот вокруг оси z и прямолинейное перемещение рабочего органа вдоль радиуса поворота с точным позиционированием в заданную точку рабочего пространства. Электромеханическая конструкция манипулятора позволяет обеспечить транспортировку объектов производства в соответствии с заданным технологическим процессом. Для проектирования технологического процесса транспортирования объектов производства разработан программный модуль, позволяющий автоматизировать описание основных операций движения рабочего органа робота-манипулятора с последующим автоматическим формированием последовательности команд для управляющей программы, обеспечивающей работу электрических приводов звеньев манипулятора в реальном времени. Чтобы ускорить процесс проектирования траектории движения рабочего органа, разработана пространственная имитационная модель робота-манипулятора в среде MatLab-Simulink. Рассматривается обобщенная схема мехатронной системы управления роботом-манипулятором на базе программируемого логического контроллера OMRON, функционирующего под управлением программы, разработанной в среде программирования Sysmac Studio Automation. Для промышленного использования мехатронной системы в период наладки и эксплуатации создана программа для программируемого терминала с интерфейсными элементами и элементами анимации. Представлен внешний вид опытного образца робота-манипулятора. Разработанная мехатронная система робота-манипулятора может быть технологически ориентирована на решение других задач промышленного производства.

Ключевые слова: мехатронная система, робот-манипулятор, компьютерные технологии, программно-аппаратные средства, микроконтроллер, технологический процесс, электрический привод, управляющая программа, имитационная модель, программируемый логический контроллер, программируемый терминал, опытный образец

Для цитирования: Управление мехатронной системой на базе многозвенных роботов-манипуляторов / Н. Н. Гурский [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 350–354. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-350-354>

Control of Mechatronic System Based on Multilink Robot-Manipulators

N. N. Hurski¹⁾, Yu. A. Skudnyakov²⁾, V. S. Artsiushchik¹⁾, A. N. Bezruchko¹⁾

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

²⁾Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The task of controlling multi-link robots with manipulators for implementation of high-tech processes in industry has been considered in the paper. The paper presents sequential steps of using computer technology in construction of robotic-

Адрес для переписки

Гурский Николай Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65, корп. 11
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-64
povt@bntu.by

Address for correspondence

Hurski Nikolai N.
Belarusian National Technical University
65/11 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-64
povt@bntu.by

manipulators, including mathematical, algorithmic, and hardware and software tools for creating a multi-drive mechatronic system controlled by OMRON industrial microcontroller. A kinematic scheme of a robot manipulator has been described in the paper and it performs the following two types of movements – rotation around the z axis and rectilinear movement of a working element along a turning radius with precise positioning at a given point in the working space. Electromechanical design of the manipulator allows to ensure transportation of production objects in accordance with a given technological process. For designing the technological process of transporting production objects, a software module has been developed that makes it possible to automate description of basic operations for movement of the robot manipulator working body with subsequent automatic generation of a command sequence for a control program ensuring operation of electric drives in manipulator links in real time. To speed up the process of designing trajectory of the working body, a spatial simulation model of a robot-manipulator in the MatLab-Simulink environment has been developed. The paper considers a generalized diagram of a mechatronic control system for a robot-manipulator based on the OMRON programmable logic controller operating under control of a program developed in the programming environment Sysmac Studio Automation. A program for a programmable terminal with interface elements and animation elements has been developed for industrial use of the mechatronic system during adjustment and operation period. The paper provides an appearance of a robot-manipulator prototype. The developed mechatronic system of the robot-manipulator can be technologically oriented towards solving other problems of industrial production.

Keywords: mechatronic system, robot-manipulator, computer technologies, software and hardware, microcontroller, technological process, electric drive, control program, simulation model, programmable logic controller, programmable terminal, prototype

For citation: Hurski N. N., Skudnyakov Yu. A., Artsiushchik V. S., Bezruchko A. N. (2019) Control of Mechatronic System Based on Multilink Robot-Manipulators. 18 (4), 350–354. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-350-354> (in Russian)

Введение

Мехатронные системы стремительно расширяют область применения. Они начинают интенсивно использоваться для реализации высокотехнологических процессов в различных отраслях промышленности, качественного улучшения характеристик широкого спектра разнообразных объектов [1]. Применение мехатронного подхода при создании устройств и машин определяет их основные преимущества по сравнению с традиционными электромеханическими системами: точность реализации сложных движений, высокая степень интеграции и надежность, долговечность, помехозащищенность и быстрое перепрограммирование для выполнения требуемых операций [2].

В статье рассматриваются особенности компьютерных технологий при построении роботов-манипуляторов, включающие математические, алгоритмические и аппаратно-программные средства для создания многоприводной мехатронной системы под управлением промышленного микроконтроллера фирмы OMRON.

Основная часть

В общем случае, для автоматизации различных производственных операций применяются многофункциональные многосвязные мани-

пуляционные роботы. Кинематическая схема многосвязного робота манипулятора показана на рис. 1.

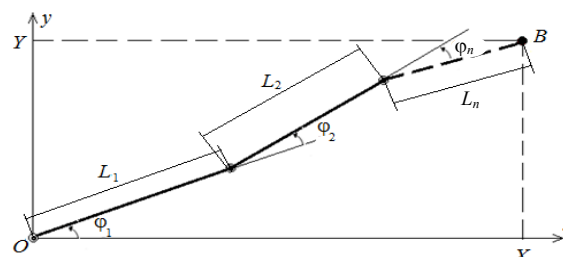


Рис. 1. Кинематика многосвязного манипулятора

Fig. 1. Kinematics of multilink manipulator

Работа манипулятора заключается в позиционировании рабочего органа (точка B) в точку с заданными координатами. Для этого используются электроприводы на базе электрических двигателей постоянного или переменного тока. Понятие электропривода, кроме двигателя, включает схему управления, редуктор, датчики.

Как известно, состояние манипулятора описывается прямой и обратной задачами кинематики [3]. Прямая задача – вычисление координат (X , Y) положения рабочего органа манипулятора по его кинематической схеме с заданными длинами звеньев (L_1 , L_2 , ..., L_n) и их ориентацией φ (здесь n – число степеней свободы манипулятора). Обратная задача – вычисление углов (φ_1 , φ_2 , ..., φ_n) по заданному положению рабочего органа в точке $B(X, Y)$.

Математическая модель прямой задачи записывается в виде вектора

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n L_i \cos \sum_{i=1}^i \varphi_i \\ \sum_{i=1}^n L_i \sin \sum_{i=1}^i \varphi_i \end{pmatrix}.$$

Технически востребованной является обратная задача кинематики. Однако она, как правило, не имеет однозначного решения, поскольку для заданного положения рабочего органа не всегда существует единственное значение углов $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$. Задача может быть решена аналитически с учетом требуемых ограничений или, в общем случае, численными методами.

Численное решение заключается в оптимизации нормы $|\vec{B} - \vec{B}_z|$, где $\vec{B}$, $\vec{B}_z$ – вектор текущих и заданных координат рабочего органа соответственно. Для поиска оптимизируемых параметров $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ с критерием оптимизации $|\vec{B} - \vec{B}_z|$ могут быть использованы методы оптимизации нулевого, первого или второго порядков, либо методы случайного поиска [4].

При решении многих практических задач, связанных с позиционированием рабочего органа в заданную точку пространства, применяется кинематическая схема двухзвеного манипулятора [5–7] с тремя степенями свободы: две вращательные с параметрами φ_1, φ_2 , третья – линейное перемещение вдоль оси z . В этом случае для решения обратной задачи используется аналитическое решение, основанное на теореме косинусов [8].

На основе данной кинематической схемы разработана электромеханическая конструкция манипулятора для транспортировки объектов производства в соответствии с требуемым технологическим процессом. Робот-манипулятор совершает два типа движений – поворот вокруг оси z и прямолинейное перемещение рабочего органа вдоль радиуса поворота с точным позиционированием в заданную точку рабочего пространства. Внешний вид робота-манипулятора показан на рис. 2. Из рисунка видно, что такая конструктивная схема имеет четыре степени свободы. С учетом прямолинейного перемещения рабочего органа вдоль радиуса

поворота степень свободы, связанная с кистью робота, может быть исключена. Такое техническое решение возможно при синхронизации поворота кисти в зависимости от угла поворота плеча. Рабочая пространственная зона манипулятора ограничивается длинами звеньев, длиной кисти, а также высотой подъема механизма манипулятора.

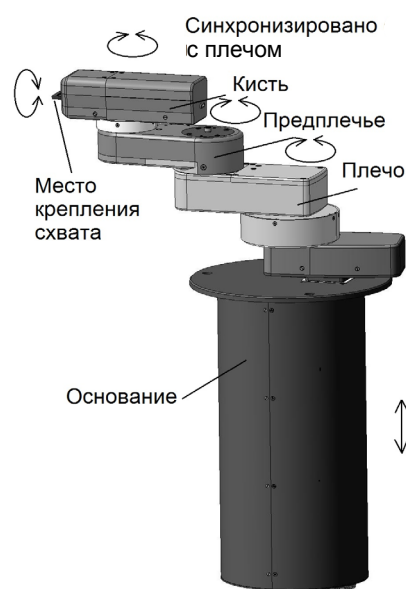


Рис. 2. Внешний вид робота-манипулятора

Fig. 2. Appearance of robot-manipulator

Для проектирования технологического процесса [9] транспортировки объектов производства разработан программный модуль, главное окно которого показано на рис. 3. На рисунке представлено множество заданных точек (для примера ограниченное 16-ю) в плоскости x – y рабочей зоны механизма, в которые может перемещаться схват манипулятора в соответствии с технологическим маршрутом. На рис. 3 показаны два положения звеньев манипулятора – одно для совершения поворота, второе – для линейного позиционирования.

При планировании маршрута движения необходимо последовательно отметить требуемые точки и задать для них тип команды и ее параметры. Для просмотра сгенерированного цифрового маршрута разработана пространственная имитационная модель манипулятора, приведенная на рис. 4. На этом рисунке цифрами обозначены производственные участки, на которые манипулятор транспортирует объекты в соответствии с рис. 3.

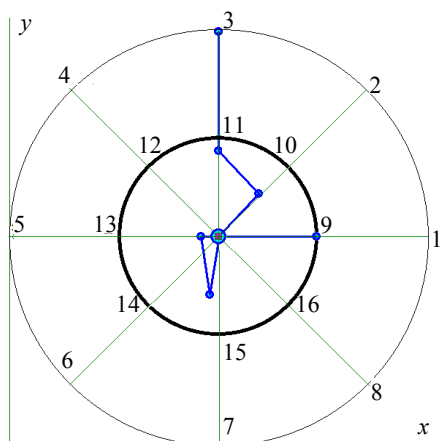


Рис. 3. Плоская модель манипулятора и траектория движения рабочего органа

Fig. 3. Plane model of manipulator and trajectory of working body movement

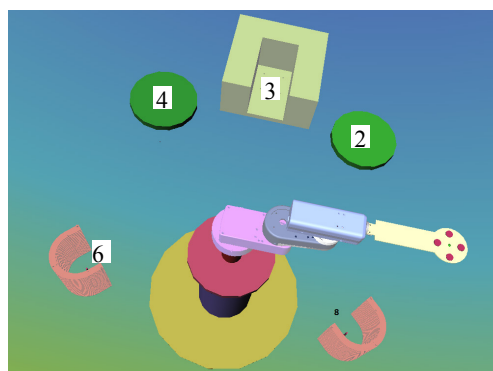


Рис. 4. 3D-модель манипулятора

Fig. 4. 3D-model of manipulator

Программная реализация планирования маршрута выполнена в среде Embarcadero RAD

Studio. Пространственная имитационная модель манипуляционного механизма реализована в программной системе MatLab-Simulink. Она дает возможность наблюдать качественную сторону динамического состояния манипулятора и ускоряет процесс проектирования реальной конструкции.

Работу манипулятора в режиме реального времени обеспечивает микроконтроллер с защитой в его память управляющей программой, основу функциональности которой составляет код, отлаженный на этапе моделирования. Для программирования микроконтроллера OMRON использовалась среда программирования Sysmac Studio Automation, поддерживающая язык релейно-контактной логики.

Обобщенная схема мехатронной системы управления роботом-манипулятором, ее взаимодействия с внешним окружением показана на рис. 5.

Для промышленного использования [10] разработанной мехатронной системы требуется дополнить ее средствами управления, необходимыми в период наладки и эксплуатации. Для этого используются программируемые терминалы с интерфейсными элементами и элементами анимации. Главный экран такого терминала показан на рис. 6.

Изложенные этапы программирования, моделирования и управления работой мехатронной системы робота-манипулятора на базе двухзвенного механизма программируемым логическим контроллером OMRON реализованы в опытном образце, внешний вид которого приведен на рис. 7.

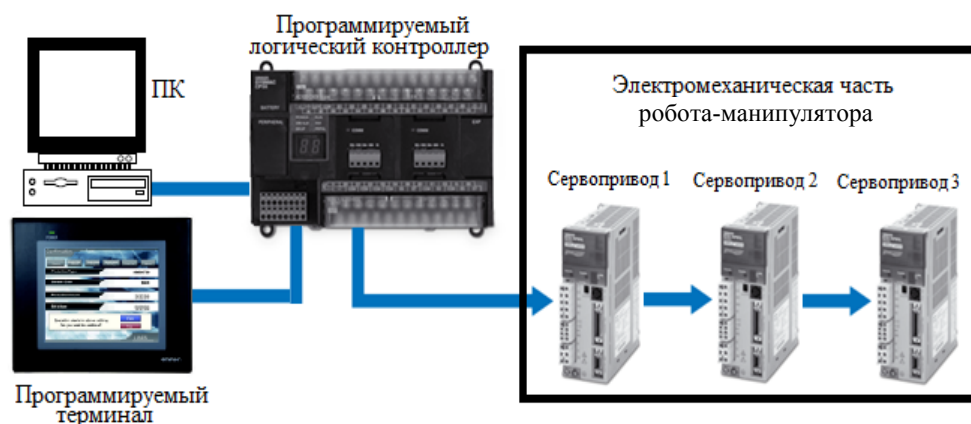


Рис. 5. Обобщенная схема мехатронной системы

Fig. 5. Generalized scheme of mechatronic system

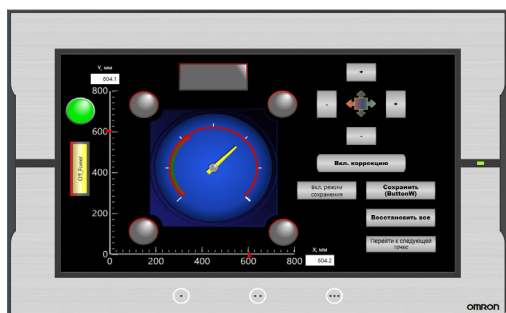


Рис. 6. Экран терминала управления манипулятором

Fig. 6. Manipulator Control Terminal Screen



Рис. 7. Опытный образец робота-манипулятора

Fig. 7. Prototype of robot-manipulator

ВЫВОДЫ

1. Разработано программное обеспечение, поддерживающее работу электрических приводов робота-манипулятора на базе двухзвенного механизма под управлением промышленного программируемого логического контроллера OMRON.

2. Создана методика проектирования технологического процесса позиционирования робота-манипулятора, позволяющая обеспечить требуемую точность и скорость транспортировки объектов производства.

3. Мехатронная система робота-манипулятора может быть технологически ориентирована на решение других задач промышленного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, С. Л. Основы управления манипуляционными роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
2. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич // 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 207 с.
3. Механика промышленных роботов / под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1988. Т. 1. Кинематика и динамика. 304 с.
4. Кетков, Ю. Л. MatLab 7: программирование, численные методы / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 752 с.

5. Гурский, Н. Н. Математические и компьютерные модели мехатронных систем аддитивного производства / Н. Н. Гурский // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. Междунар. науч. конф. СПб., 2017. Т. 12, ч. 1. С. 151–156.
6. Бургин, Б. Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем / Б. Ш. Бургин // Новосибирск: Новосиб. электротех. ин-т, 1992. 199 с.
7. Имитационное моделирование механизма наплавления пластмасс в аддитивных технологиях / Н. Н. Гурский [и др.] // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. Т. 12, № 4. С. 25–30.
8. Попов, Е. П. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы / Е. П. Попов, А. Ф. Верещагин, С. Л. Зенкевич. М.: Наука, 1978. 398 с.
9. Пол, Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора / Р. Пол. М.: Наука, 1976. 104 с.
10. Бурдаков, С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко. М.: Высш. шк., 1986. 264 с.

Поступила 17.04.2019

Подписана в печать 25.06.2019

Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. (2004) *Fundamentals for Control of Manipulation Robots*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 480 (in Russian).
2. Yurevich E. I. (2005) *Fundamentals of Robotics*. 2nd ed. Saint-Petersburg, Publishing House "BKhV-Peterburg". 207 (in Russian).
3. Vorob'ev E. I., Popov S. A., Sheveleva G. I., Frolov K. V. (1988) *Mechanics of Industrial Robots Vol. 1. Kinematics and Dynamics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).
4. Ketkov Yu. L., Ketkov A. Yu., Schultz M. M. (2005) *MatLab 7: Programming, Numerical Methods*. Saint-Petersburg: Publishing House "BKhV-Peterburg". 752 (in Russian).
5. Gurskii N. N. (2017) Mathematical and Computer Models of Mechatronic Systems for Additive Production. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh: Sb. Tr. Mezhdunar. Nauch. Konf. T. 12, Ch. 1* [Mathematical Methods in Engineering and Technology: Collection of Papers of International Scientific Conference. Vol. 12. Part 1]. Saint-Petersburg, 151–156 (in Russian).
6. Burgin B. Sh. (1992) *Analysis and Synthesis of Two-Mass Electromechanical Systems*. Novosibirsk, Novosibirsk. Electro-Technical Institute. 199 (in Russian).
7. Gurskii N. N., Skachek V. A., Skachek A. V., Skudnyakov Yu. A. (2016) Simulation Modeling of Mechanism for Welding Plastics in Additive Technologies. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, 12 (4), 25–30 (in Russian).
8. Popov E. P., Vereshchagin A. F., Zenkevich S. L. (1978) *Manipulation Robots. Dynamics and Algorithms*. Moscow, Nauka Publ. 398 (in Russian).
9. Paul R. (1976) *Modeling, Trajectory Planning and Motion Control of Robotic Arm*. Moscow, Nauka Publ. 104 (in Russian).
10. Burdakov S. F., Dyachenko V. A. (1986) *Designing of Manipulators for Industrial Robots and Robotic Complexes*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 264 (in Russian).

Received: 17.04.2019

Accepted: 25.06.2019

Published online: 31.07.2019