

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)
ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] № 4

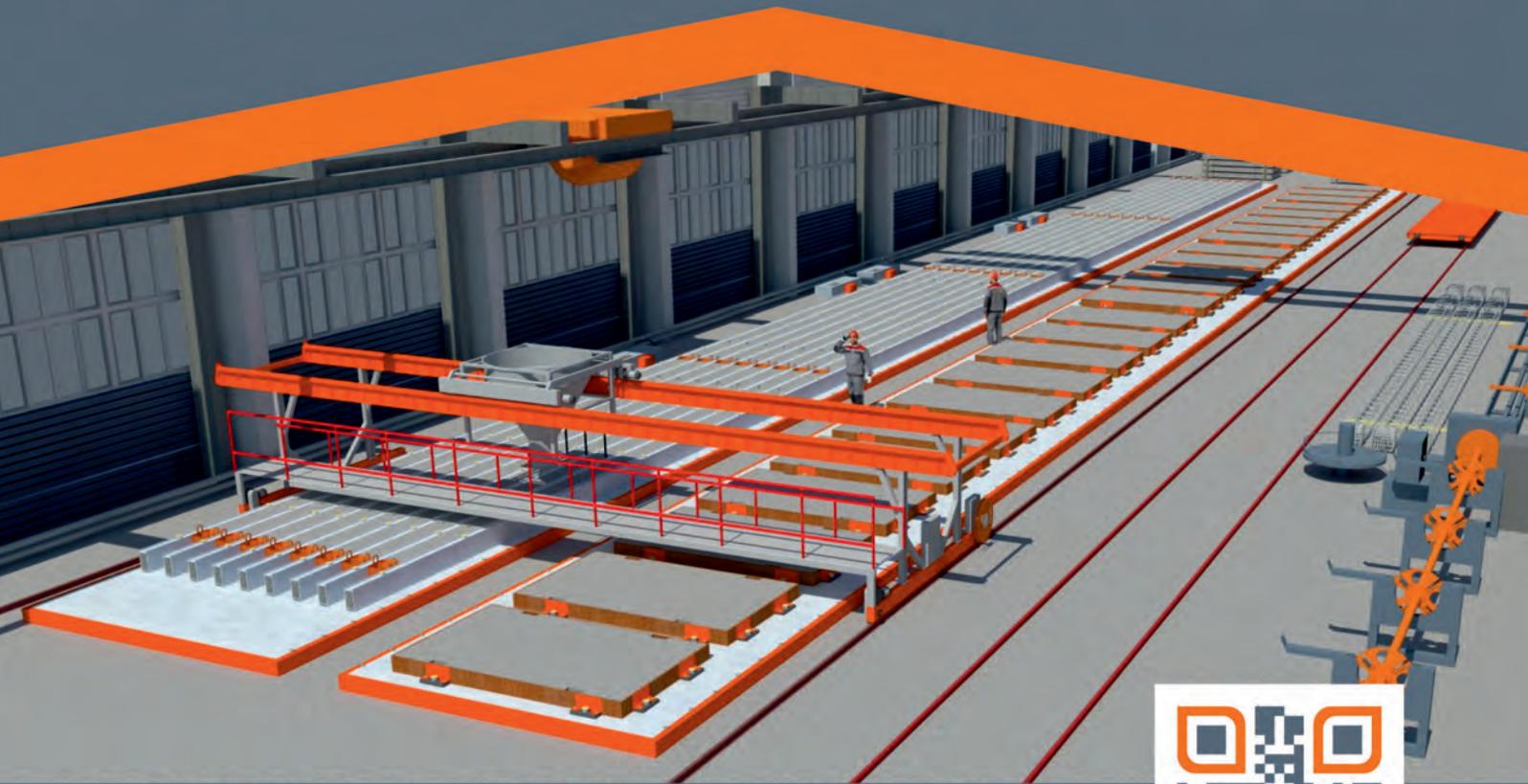


НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU АПРЕЛЬ 2023 г. (812)



ПРИВОЛЖСКИЙ ЦЕНТР
СТРОИТЕЛЬНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

Мы поставляем больше,
чем просто оборудование,
мы поставляем технологию



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОСНАЩЕНИЕ ЗАВОДОВ ЖБИ



Реклама

23-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

**23-25 августа
2023**

ВАЛТИМІХ

МУРМАНСК  **2023**

**Сияем
МОЩНО**



КВИНТЕТ
EVENT АГЕНТСТВО

СМ и Т



baltimix.ru

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Свид. о регистрации ПИ № 77–1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,
Russian Science Citation Index
на платформе Web of Science
Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 4

Основан в 1955 г.

(812) Апрель 2023 г.

Тел.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Отрасль в современных условиях

А.А. СЕМЁНОВ

Обзор российского рынка цемента: итоги 2022 г. 4

Современные бетоны

Н.М. КРАСНИКОВА, Д.Г. АНТЫШЕВ, А.Р. ФАТХУТДИНОВ, Д.А. КАЛМЫКОВ, А.Б. НЕКРАСОВ

Новый подход к складированию готовой продукции на заводах ЖБИ 7

А.М. СУЛЕЙМАНОВ, А.Р. ШАКИРОВ

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок,
усиленных углепластиком. 10

Производственная гибкость и многофункциональность современных технологических комплексов
по изготовлению сборного железобетона (Информация) 18

С.В. СОКОЛОВА, М.Н. БАРАНОВА, Д.И. ВАСИЛЬЕВА, Ю.А. ХОЛОПОВ

Вторичное использование глиноземсодержащих отходов промышленности для синтеза жаростойких бетонов. 20

В.Г. ХОЗИН, А.Р. ГИЗДАТУЛЛИН, И.Т. МИРСАЯПОВ, Р.Р. ЯРУЛЛИН, И.В. БОРОВСКИХ

Совместная работа эпоксидного композита и защитного покрытия с цементным бетоном
в зоне их адгезионного контакта 24

О.В. ФОТИН

Строительство из сборного железобетона 32

Л.И. КАСТОРНЫХ, А.В. КАКЛЮГИН, М.А. ГИКАЛО

Влияние суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов
на эффективность термообработки монолитного бетона 35

С.С. КАПРИЕЛОВ, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД, Н.М. СЕЛЮТИН

Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 —
новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий 42

Р.Р. САХИБГАРЕЕВ, Л.Н. ЛОМАКИНА, Ром.Р. САХИБГАРЕЕВ, Д.А. СЕНИЦИН, А.А. ИБРАЕВ

Исследование процессов твердения тяжелого бетона в условиях попеременного замораживания
и оттаивания при зимнем бетонировании 51

Н.С. СОКОЛОВ, С.Н. СОКОЛОВ, А.Н. СОКОЛОВ

Геотехническая технология воздействия радиогидравлического удара
при сверхвысокочастотных процессах для устройства буроинъекционных свай 60

Результаты научных исследований

З.Т.Л. НГУЕН, В.А. ШВЕЦОВА, С.В. САМЧЕНКО

Влияние комплексных добавок на основе глиноземистого цемента и трепела на свойства портландцемента 65

В.Б. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ, М.Ю. ЗАВАДЬКО, Т.Б. НОВИЧЕНКОВА, К.С. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ, А.Ф. БУРЬЯНОВ

Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления
в сухих строительных смесях. Часть 1 73

Ю.В. ШТЕФАН, Б.А. БОНДАРЕВ

Жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги и управление рисками
на стадиях проектирования и изысканий 80

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

Founder of the journal: «STROYMATERIALY»
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Publisher: «STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Registration certificate PI № 77–1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Included in the list of journals of the Higher
Attestation Commission (Russia), Russian Science
Citation Index on the platform Web of Science
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

Founded in 1955

№ 4
(812) April 2023

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Industry under present conditions

A.A. SEMENOV

Overview of the Russian Cement Market: Results of 2022 4

Modern concretes

N.M. KRASNIKOVA, D.G. ANTYSHEV, A.R. FATHUTDINOV, D.A. KALMYKOV, A.B. NEKRASOV

A New Approach to Warehousing Finished Products at Precast Concrete Plants. 7

A.M. SULEJMANOV, A.R. SHAKIROV

Experimental Study of the Stress-Strain State of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber 10

Production Flexibility and Multifunctionality of Modern Technological Complexes

for the Production of Precast Concrete (Information) 18

S.V. SOKOLOVA, M.N. BARANOVA, D.I. VASILIEVA, Y.A. KHOLOPOV

Recycling of Alumina-Containing Industrial Waste for the Synthesis of Heat-Resistant Concrete 20

V.G. KHOZIN, A.R. GIZDATULLIN, I.T. MIRSAPOV, R.R. YARULLIN, I.V. BOROVSKIKH

Combined Action of Epoxy Composite and Protective Coating with Cement Concrete in the Adhesive Contact Zone 24

O.V. FOTIN

Construction of Precast Reinforced Concrete 32

L.I. KASTORNYKH, A.V. KAKLYUGIN, M.A. GIKALO

The Effect of Polycarboxylate-Based Superplasticizers on the Efficiency of Heat Treatment of Monolithic Concrete 35

S.S. KAPRIELOV, A.V. SHEYNFELD, N.M. SELYUTIN

Self-Compacting High-Strength Expanded Clay Concrete of B50-B65 Classes –

a New Generation of Expanded Clay Concretes for Structures of High-Rise Building 42

R.R. SAKHIBGAREEV, L.N. LOMAKINA, Rom.R. SAKHIBGIREEV, D.A. SINITSIN, A.A. IBRAEV

Investigation of Heavy Concrete Hardening Processes under Condition of Alternate Freezing

and Thawing During Winter Concreting 51

N.S. SOKOLOV, S.N. SOKOLOV, A.N. SOKOLOV

Geotechnical Technology of the Impact of Radio Hydraulic Shock at Ultrahigh-Frequency Processes

for the Installation of Bored-Injection Piles 60

Results of scientific research

D.T.L. NGUYEN, V.A. SHVETSOVA, S.V. SAMCHENKO

Influence of Complex Additives Based on Alumina Cement and Trepel on the Properties of Portland Cement 65

V.B. PETROPAVLOVSKAYA, M.Y. ZAVADKO, T.B. NOVICHENKOVA, K.S. PETROPAVLOVSKII, A.F. BURYANOV

Prospects for the Bottom Ash From Hydraulic Removal use if in Dry Building Mixtures. Part 1. 73

Yu.V. SHTEPHAN, B.A. BONDAREV

Life Cycle of a Logging Road and Risk Management at the Design and Survey Stages 80

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е.И.,

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,

д-р экон. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

д-р техн. наук, директор Российской гипсовой ассоциации (Москва)

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

канд. техн. наук, президент Союза производителей керамзита и керамзитобетона (Самара)

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Саранск)

КОРОЛЕВ Е.В.,

д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербург)

КОТЛЯР В.Д.,

д-р техн. наук, профессор (Ростов-на-Дону)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Белгород)

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

РУДАКОВ О.Б.,

д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

ТРАВУШ В.И.,

д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Иваново)

СТРОКОВА В.В.,

д-р техн. наук, советник РААСН (Белгород)

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

BURYANOV A.,

Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association of gypsum (Moscow)

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

Candidate of Science (Engineering), President of the Union of Haydite and Haydite Concrete Producers (Samara)

EROFEEV V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Saransk)

KOROLEV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

KOTLYAR V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Rostov-on-Don)

LEONOVICH S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,

Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS (Belgorod)

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Member of the Russian Academy of Natural Science (Novosibirsk)

PUKHARENKO Yu.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

RUDAKOV O.B.,

Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

STROKOVA V.

Doctor of Science (Engineering), Advisor of RAACS (Belgorod)

TRAVUSH V.,

Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

FEDOSOV S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Ivanovo)

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

SHEBL S.M.,

Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,

Candidate of Science (Engineering), ООО «INTA-Stroy» (Omsk)

SHTACKELBERG D.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

А.А. СЕМЁНОВ, канд. техн. наук, генеральный директор (info@gs-expert.ru)

ООО «ГС-Эксперт» (г. Москва) <http://www.gs-expert.ru/>

Обзор российского рынка цемента: итоги 2022 г.

Представлен обзор состояния и основные тенденции развития рынка цемента России в 2022 г. Приведены данные об объемах и динамике производства, потребления и внешнеторговых операций с цементом. В структуре производства цемента сохраняется тенденция увеличения доли выпуска бездобавочных портландцементов. Традиционно среди субъектов Федерации основным рынком сбыта является Московский регион, на долю которого приходится до 16% общероссийского потребления этой продукции. На протяжении всего года наблюдался устойчивый рост цен на цемент: за 2022 г. этот показатель вырос на 25,2% по сравнению с уровнем 2021 г. – до 6536 р./т.

Ключевые слова: цемент, анализ рынка, потребление цемента, динамика цен.

Для цитирования: Семенов А.А. Обзор российского рынка цемента: итоги 2022 г. // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 4–6.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-4-6>

A.A. SEMENOV, Candidate of Sciences (Engineering), General Director, (info@gs-expert.ru)

GS-Expert LLC (17, bldg. 1, Architect Vlasov Street, Moscow, 117335, Russian Federation) <http://www.gs-expert.ru/>

Overview of the Russian Cement Market: Results of 2022

An overview of the state and main trends in the development of the Russian cement market in 2022 is presented. Data on the volumes and dynamics of production, consumption and foreign trade operations with cement are given. In the structure of cement production, there is a tendency to increase the share of production of Portland cements without additives. Traditionally, among the subjects of the Federation, the main sales market is the Moscow region, which accounts for up to 16% of the total Russian consumption of these products. Throughout the year, there was a steady increase in cement prices: in 2022, this indicator increased by 25.2% compared to the level of 2021 to 6,536 rubles/t.

Keywords: cement, market analysis, cement consumption, price dynamics.

For citation: Semenov A.A. Overview of the Russian cement market: results of 2022. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 4–6. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-4-6>

По итогам 2022 г., по данным Росстата, в России было произведено 60,7 млн т цемента (+1,3% к уровню предыдущего года). При этом в I квартале объем производства цемента вырос на 20,5% по сравнению с аналогичным периодом 2021 г. После начала СВО на Украине темпы роста производства существенно замедлились и во II–III кварталах варьировались в диапазоне 0,4–3,5%. В IV квартале зафиксировано существенное, на 10,9% к уровню IV квартала 2021 г., падение объемов производства (рис. 1).

Если анализировать итоги 2022 г. рост объемов производства цемента наблюдаются во всех федеральных округах, за исключением Северо-Западного, Приволжского и Сибирского. Наиболее высокие темпы роста выпуска цемента отмечены в Северо-Кавказском федеральном округе (+14,2% к уровню предыдущего года) и Дальневосточном федеральном округе (+10,8% г./г.) (рис. 2).

При этом в IV квартале 2022 г. падение объемов производства цемента наблюдалось во всех федеральных округах (рис. 3).

В структуре производства цемента сохраняется тенденция увеличения доли выпуска бездобавочных портландцементов. По итогам 2022 г. она достигла 63,7% общего объема производства цемента в России, хотя еще в 2013 г. доля бездобавочных портландцементов составляла порядка 46%. Второе место по объемам производства занимают портландцементы с минеральными добавками – около 31% общего объ-

ема производства цемента в стране. На третьем месте шлакопортландцемент – менее 3% (рис. 4).

По итогам 2022 г. объем отгрузки цемента железнодорожным транспортом на внутренний рынок снизился на 3,8%, до 24,3 млн т. На долю отгрузки железнодорожным транспортом в январе–декабре 2022 г. пришлось всего 40,6% общего объема отгрузки цемента против 42,8% по итогам 2021 г.

В связи с проведением СВО на Украине ФТС РФ с марта прекратила публикацию данных по экспорту и импорту товаров, чтобы «избежать некорректных оценок, спекуляций и разночтений». Аналогично были закрыты данные по объемам внешнеторговых операций между Республикой Беларусь и Российской Федерацией со стороны Республики Беларусь. Данные по объемам внешнеторговых операций получены на основе комплексной оценки ГС-Эксперт на основе данных таможенной статистики основных стран – торговых партнеров РФ.

Импорт цемента в Россию по итогам 2022 г. вырос на 26%, до 1,96 млн т. При этом после начала СВО объемы импортных поставок цемента в страну резко сократились: во II квартале объем импорта снизился на 20% по сравнению с аналогичным периодом 2021 г. Однако уже в III квартале рост импорта цемента в РФ возобновился благодаря наращиванию объемов поставок из Беларуси и Ирана. За июль–сентябрь 2022 г. объем импорта цемента вырос на 26% по сравнению с объемами поставок в III квартале 2021 г. и на 45%

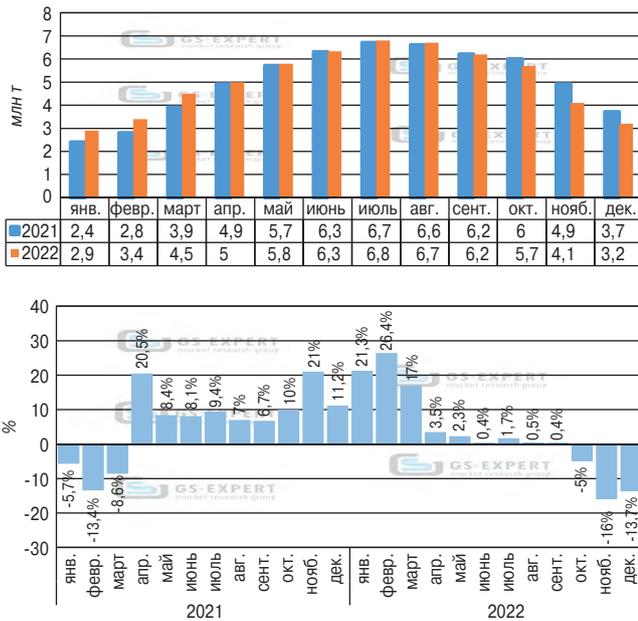


Рис. 1. Динамика производства цемента в РФ в 2021–2022 гг. Источник: Росстат
Fig. 1. Dynamics of cement production in the Russian Federation in 2021–2022. Source: Rosstat

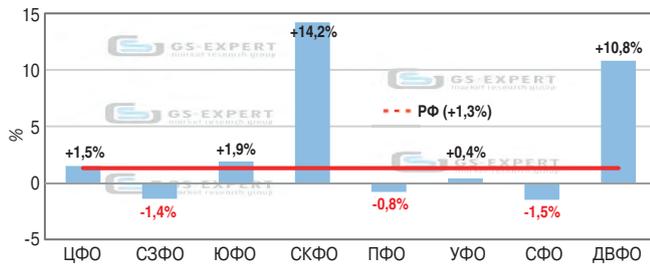


Рис. 2. Темпы роста производства цемента в разрезе федеральных округов в IV квартале 2022 г. Источник: Росстат, оценка ГС-Эксперт
Fig. 2. Cement production growth rates by federal districts in 2022. Source: Rosstat, GS-Expert estimates

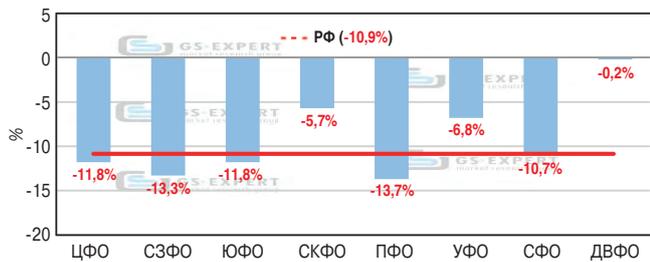


Рис. 3. Темпы роста производства цемента в разрезе федеральных округов в IV квартале 2022 г. Источник: Росстат, оценка ГС-Эксперт
Fig. 3. Growth rates of cement production by federal districts in 4 quarter of 2022. Source: Rosstat, GS-Expert estimate

превысил объем поставок во II квартале 2022 г. В IV квартале наблюдался сезонный спад объемов импорта, однако по сравнению с предыдущим годом ввоз цемента в РФ вырос на 82% (рис. 5).

Поставки цемента в Россию осуществлялись из девяти стран мира. Основной объем поставок (около 73%) традиционно пришелся на долю Республики Беларусь. Объемы импорта цемента из этой страны выросли на 30% по сравнению с 2021 г. На второе место по объемам поставок цемента вышел Иран (около

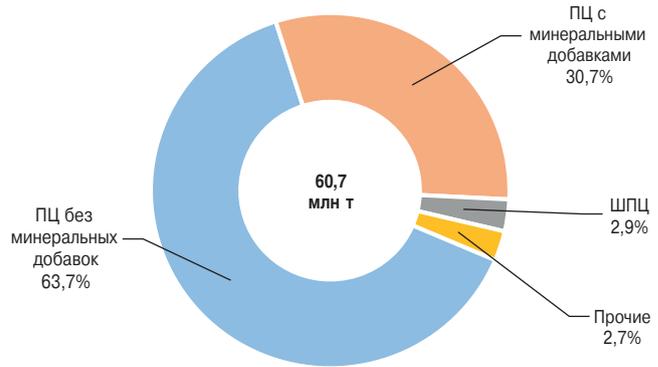


Рис. 4. Товарная структура производства цемента в России по итогам 2022 г. Источник: Росстат, оценка ГС-Эксперт
Fig. 4. Commodity structure of cement production in Russia in 2022. Source: Rosstat, GS-Expert estimate



Рис. 5. Динамика импорта цемента в Россию в 2021–2022 гг. Источник: оценка ГС-Эксперт
Fig. 5. Dynamics of cement imports to Russia in 2021–2022. Source: GS-Expert estimate



Рис. 6. Динамика экспорта цемента в Россию в 2021–2022 гг. Источник: оценка ГС-Эксперт
Fig. 6. Dynamics of cement exports to Russia in 2021–2022. Source: GS-Expert estimate

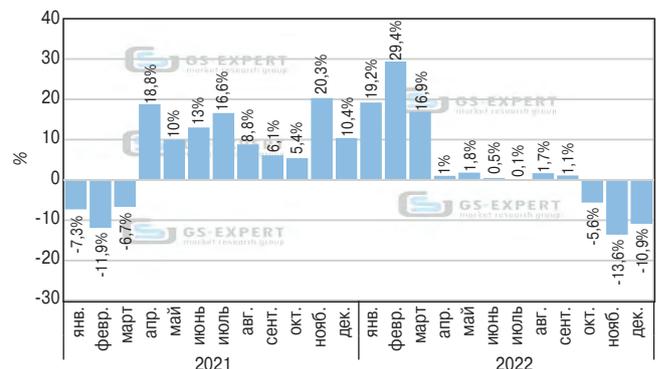


Рис. 7. Темпы роста потребления цемента в РФ в 2021–2022 гг. Источник: оценка ГС-Эксперт
Fig. 7. The growth rate of cement consumption in the Russian Federation in 2021–2022. Source: GS-Expert estimate

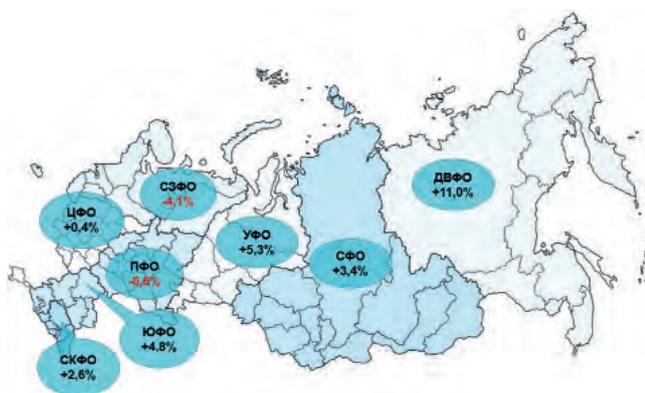


Рис. 8. Темпы роста потребления цемента в РФ в разрезе федеральных округов в 2022 г. *Источник: оценка ГС-Эксперт*
Fig. 8. Growth rates of cement consumption in the Russian Federation by federal districts in 2022. *Source: GS-Expert estimate*

11% общего объема российского импорта). Поставки цемента из Ирана в 2022 г. выросли в 3,1 раза по сравнению с предыдущим годом. Поставки из всех остальных стран – поставщиков цемента существенно сократились по сравнению с уровнем 2021 г.

Объем экспорта цемента в 2022 г. снизился на 30% по сравнению с предыдущим годом, до менее чем 1 млн т. При этом в I квартале 2022 г. отмечался рост объемов экспорта на 26% по сравнению с аналогичным периодом 2021 г., а в последующие периоды наблюдалось устойчивое сокращение объемов поставок, что было обусловлено негативным влиянием санкций (логистические трудности, проблемы с проведением платежей, страхованием и т. д.) (рис. 6).

Экспортные поставки российского цемента осуществлялись в 18 стран мира, однако основными рынками сбыта были Республика Казахстан и Республика Беларусь, на долю которых суммарно пришлось около 88% российского экспорта. Поставки цемента во все страны, за исключением Абхазии и Азербайджана, существенно сократились.

Потребление цемента по итогам 2022 г., по оценкам ГС-Эксперт, выросло на 1,8% по сравнению с уровнем 2021 г., до 61,5 млн т.

После роста спроса на цемент в I квартале 2022 г. на 21%, во II и III кварталах в России наблюдалась стагнация объемов потребления данной продукции. В IV квартале 2022 г. потребление цемента в стране обвалилось почти на 9% по сравнению с уровнем IV квартала 2021 г. (рис. 7).

Рост объемов потребления цемента по итогам 2022 г. наблюдался во всех федеральных округах, за исключением Северо-Западного и Приволжского. Наиболее высокие темпы роста спроса отмечены в Дальневосточном, Уральском и Южном округах (рост на 11% по сравнению с 2021 г., 5,3 и 4,8% соответственно). Падение спроса на цемент по итогам года наблюдается в 37 регионах РФ, в том числе в IV квартале – в 65 регионах (рис. 8).

Среди субъектов Федерации основным рынком сбыта цемента в 2022 г. традиционно был Московский регион (Москва и Московская область), где было ре-



Рис. 9. Динамика средних цен производителей на цемент в России в 2021–2022 гг. *Источник: Росстат*
Fig. 9. Dynamics of average producer prices for cement in Russia in 2021–2022. *Source: Rosstat*

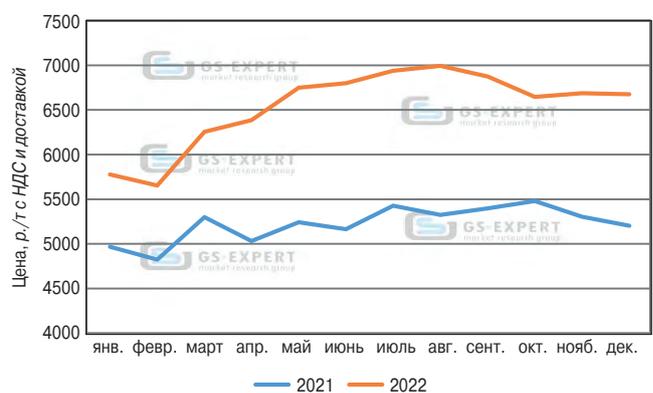


Рис. 10. Динамика средних цен приобретения цемента в России в 2021–2022 гг. *Источник: Росстат*
Fig. 10. Dynamics of average purchase prices for cement in Russia in 2021–2022. *Source: Rosstat*

ализовано, по оценкам ГС-Эксперт, около 9,5 млн т цемента, или порядка 16% от общероссийского потребления этой продукции. Второе место по объемам потребления цемента в 2022 г. занял Краснодарский край – 4,4 млн т (около 7% общероссийского потребления), на третьем месте – Ленинградский регион (Санкт-Петербург и Ленинградская область) – около 3,9 млн т (6% общероссийского потребления).

На протяжении всего 2022 г. наблюдался устойчивый рост цен на цемент. По итогам года средняя цена производителей на цемент (без учета НДС, стоимости доставки, сбытовых и посреднических расходов) выросла на 20,8% по сравнению с уровнем 2021 г. и составила 4850 р./т. Среди федеральных округов наиболее высокие цены производителей на цемент традиционно характерны для предприятий Северо-Западного, Южного, Северо-Кавказского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Минимальные цены отмечаются в Приволжском и Уральском федеральных округах (рис. 9).

Средняя цена приобретения цемента строительными и подрядными организациями (с учетом НДС, доставки, сбытовых и посреднических расходов), по данным Росстата, за 2022 г. выросла на 25,2% по сравнению с уровнем предыдущего года, до 6536 р./т (рис. 10).

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-7-9>

Н.М. КРАСНИКОВА¹, канд. техн. наук, заместитель директора по качеству, главный технолог (knm0104@mail.ru); Д.Г. АНТЫШЕВ², начальник отдела внутреннего аудита (DAntyshev@abdev.ru), А.Р. ФАТХУТДИНОВ², главный специалист отдела внутреннего аудита (AFathutdinov2@abdev.ru); Д.А. КАЛМЫКОВ¹, заместитель директора по производству (DKalmykov@abdev.ru), А.Б. НЕКРАСОВ¹, директор (ANekrasov@abdev.ru)

¹ ООО «КДСК» (420087, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, 118)

² ООО «АК БАРС ДЕВЕЛОПМЕНТ» (420081, пр. Альберта Камалеева, 28/9)

Новый подход к складированию готовой продукции на заводах ЖБИ

Актуальность темы обусловлена тем, что логистика складирования продукции железобетонных заводов значительно отстает от логистики складирования мелкочтучных товаров, которая сделала огромный рывок, прежде всего за счет методов математического анализа. Существующие правила складирования готовой продукции ЖБИ не отвечают современным тенденциям формирования процессов логистики. На примере ООО «Казанский ДСК» показана новая модель складирования готовой продукции, позволяющая значительно сократить время погрузки изделий на строящиеся объекты и осуществлять оперативное управление процессом за счет автоматического учета в системе 1С: Управление производственным предприятием.

Ключевые слова: завод ЖБИ, индустриальное домостроение, производство железобетонных изделий, логистика, склад готовой продукции, штрихкодирование, время погрузки.

Авторы статьи благодарят всех участников проекта «Организация работы складов»: начальника ЦКИР М.М. Коткова, начальника ОТК А.К. Мамина, начальника технологического отдела Р.А. Веденева.

Для цитирования: Красникова Н.М., Антышев Д.Г., Фатхутдинов А.Р., Калмыков Д.А., Некрасов А.Б.

Новый подход к складированию готовой продукции на заводах ЖБИ // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 7–9.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-7-9>

N.M. KRASNIKOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Director for Quality, Chief Technologist(knm0104@mail.ru);

D.G. ANTYSHEV², Head of the Internal Audit Department (DAntyshev@abdev.ru),

A.R. FATHUTDINOV², Chief Specialist of the Internal Audit Department (AFathutdinov2@abdev.ru);

D.A. KALMYKOV¹, Deputy Director of Production (DKalmykov@abdev.ru),

A.B. NEKRASOV¹, Director (ANekrasov@abdev.ru)

¹ LLC "KDSK" (118, Adelya Kutuya Street, Kazan, 420087, Russian Federation)

² LLC "AK BARS DEVELOPMENT" (28/9, Alberta Kamaleeva Avenue, 420081, Kazan, Russian Federation)

A New Approach to Warehousing Finished Products at Precast Concrete Plants

The relevance of the topic is due to the fact that the logistics of warehousing products of reinforced concrete plants lags far behind the logistics of warehousing small-piece goods, which has made a huge breakthrough, primarily due to the methods of mathematical analysis. The existing rules for storing finished concrete products do not meet the current trends in the formation of logistics processes. On the example of LLC "Kazansky DSK", a new model of warehousing of finished products is shown, which makes it possible to significantly reduce the time of loading products on objects under construction and to carry out operational process management due to automatic accounting with system 1C: Production Enterprise Management.

Keywords: precast concrete plant, industrial housing construction, production of reinforced concrete products, logistics, warehouse for finished products, barcoding, loading time.

The authors of the article thank all the participants of the project "Organization of work of warehouses": the head of the TsKIR M.M. Kotkov, the head of the QCD A.K. Mamin, the head of the technological department R.A. Vedenev.

For citation: Krasnikova N.M., Antyshev D.G., Fathutdinov A.R., Kalmykov D.A., Nekrasov A.B. A new approach to warehousing finished products at precast concrete plants.

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 7–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-7-9>

Логистика складирования в современных условиях представляет собой сложную, многоуровневую систему, решающую ряд различных задач и состоит из взаимосвязанной работы множества процессов, содержание которых направлено на оптимизацию материального потока на предприятии [1]. Конечной целью является оптимизация потоков, связанных с производством и потребителями, подразумевая сокращение складских мощностей, запасов сырья и материалов, а также числа складов готовой продукции.

Функционирование логистики складирования, вне зависимости от вида продукта и вида склада, имеет общие признаки и включает в себя реализацию следующих процессов [2, 3]:

- управление распределением;
- управление заказами;
- обслуживание заказов клиентов;
- складское хранение;
- услуги транспортировки;
- создание внешней тары;
- управление возвратными потоками.



Рис. 1. Схема зонирования склада
Fig. 1. Warehouse zoning scheme



Рис. 2. Штрихкодирование зоны хранения
Fig. 2. Barcoding the storage area



Рис. 3. Штрихкодирование в тело бетона
Fig. 3. Barcoding into the concrete body

При этом логистика железобетонных изделий имеет два главных отличия от мелкоштучной продукции – это хранение ЖБИ на открытых складах и трудность воспроизводства базовой логистической теории Паретто (ABC-анализ, в основе которого лежит разделение объекта анализа на три группы по степени их важности и эффективности по определенному критерию), где товары делятся на три группы: группа «А» даст 80% прибыли при содержании 20% товара; группа «В» – 15% прибыли при содержании 30% товара; группа «С» – 5% прибыли при содержании 50% товара [4].

Следует также отметить отсутствие современной информации по организации склада готовой продукции заводов по производству ЖБИ, КПД и т. д. Из-за этого, как правило, приходится использовать учебную литературу [5 и др.], в которой даются азы по проектированию и правилам хранения. По информации из источников можно сделать краткое обобщение по организации склада:

- склады готовой продукции предприятий железобетонных изделий предназначены для хранения прошедших технический контроль изделий до отгрузки их потребителю, как правило, автотранспортом. Склад ЖБИ представляет собой открытую площадку, оборудованную подъемно-транспортными механизмами;

- изделия на складе хранят в штабелях или кассетах в соответствии с ГОСТами на изделия (высота штабеля, способы опирания изделий, их назначение, расположение монтажных петель и т. д.). В каждом штабеле должны находиться изделия одного типа размера или марки;

- изделия должны храниться с опиранием на деревянные прокладки, в рабочем положении. Длинномерные изделия складываются в горизонтальном положении, стеновые панели – в вертикальном;

- в целях сокращения простоев транспорта и обеспечения равномерной загрузки кранов количество штук изделий в пролетах должно быть примерно одинаковым, а изделия одного типа рекомендуется складировать в разных пролетах;

- запас готовых изделий на складе должен быть рассчитан на 10–11 рабочих суток, в зависимости от назначения предприятия и ритмичности работы транспорта.

Исходя из перечисленного, можно сделать вывод, что в профильной литературе отсутствует описание самого механизма организации складского хозяйства.

Как правило, на заводах КПД и ЖБИ отсутствуют автоматизированные процессы по хранению, перемещению и отгрузке готовой продукции. Ввиду большого объема хранения на складах (как правило, более двух домов) возникают проблемы по их учету (при инвентаризации), быстрому поиску и т. д.

В представленной работе на примере ООО «Казанский ДСК» показаны результаты по проекту «Организация работы складов».

ООО «Казанский ДСК» в настоящее время – это ведущий производитель крупного панельного домостроения не только в Республике Татарстан, но и в ПФО. Предприятие входит в группу компаний «Ак Барс Дом» (АК БАРС Девелопмент), где все процессы строительства, от проекта дома до его реализации, включены в одну производственную цепочку [6]. Завод имеет четыре склада готовой продукции с объемом размещения в среднем 35000 м³; в качестве грузоподъемных механизмов на трех складах используют автокраны и на одном – мостовые краны. Одновременно на складах хранятся от четырех до восьми домов.

Изделия хранятся по типоразмеру. При этом отгрузка изделий осуществляется пономенклатурно, согласно циклограмме выполнения монтажных работ на строительном объекте.

Рабочая группа выявила несколько причин, сдерживающих работу склада:

- информация по перемещению готовой продукции осуществляется в ручном режиме;
- отсутствие штрихкодов на принятых изделиях (из-за ненадежной фиксации);
- хаотичное хранение готовой продукции;
- отсутствие актуальной информации о месте хранения готовых изделий и, как следствие, частая перестановка автокрана при погрузке одной машины.

Для решения поставленных задач было проведено зонирование всех складов с разбивкой на зоны (зоны организовали от колоны до колонны) (рис. 1).

Каждой зоне и находящейся в ней стойке присвоили свой штрихкод (рис. 2).

Следует отметить, что каждое изделие помимо маркировочной надписи имеет свой индивидуальный штрихкод, по которому возможно отследить все этапы изготовления изделия. Ранее на изделия прикреплялась лента-риббон со штрихкодом, которая в процессе хранения в естественных погодных условиях отходила от поверхности изделия. Решением этой проблемы стало крепление бирки-паспорта с штрихкодом гвоздезабивным инструментом (гвоздь должен быть не более: $\varnothing=2,6$ мм; $l=20$ мм) (рис. 3). Данное крепление показало, что его можно отнести к антивандальному.

Автоматизация процесса хранения заключается в объединении (привязке) информации в системе 1С: УПП считывающим устройством паспортных данных изделия, стойки и зоны: стропальщик после установки изделия сначала сканирует штрихкод из-

деля, затем штрихкоды стойки и зоны. Все данные сразу отражаются в системе 1С, что значительно ускоряет процесс инвентаризации.

Для облегчения визуального поиска и группирования изделий по домам на каждый дом дополнительно наносилась цветовая маркировка.

Результат работы – решение всех поставленных задач, а именно появились:

- актуальная информация о месте хранения готовых изделий;
- автоматический учет по всем перемещениям изделий, как на складе хранения, так и со склада готовой продукции. И как следствие, сокращение времени пономенклатурного поиска и погрузки изделий на панелевозы (с учетом работы автокрана) в два раза, с четырех до двух часов.

Руководство каждого отдельного предприятия по-разному решает вопросы складирования продукции, так как нет единого универсального решения. При этом основными критериями эффективности являются экономические показатели, представляющие собой отношение затрат на складирование к итоговому финансовым результатам.

При рациональной организации складских процессов сокращаются затраты времени, необходимого для обработки транспорта; снижаются издержки на операции складирования и хранения готовой продукции; не требуется излишней перегрузки ресурсов с места на место; персонал выполняет нормы выработки, рационально используются необходимые транспортные средства и погрузочно-разгрузочное оборудование.

Список литературы

1. Исмагилова Э.Р., Шакиров А.Т. Совершенствование деятельности в системе складирования // *Национальная ассоциация ученых (НАУ)*. 2021. № 65. С. 18–24.
2. Иванов Г.Г., Киреева Н.С. Складская логистика. М.: Инфра-М, 2020. 192 с.
3. Белозерский А.Ю., Мешалкин В.П. Основы логистики складирования. Калуга: Манускрипт, 2009. 155 с.
4. Таишева Г.Р., Гафурова Г.Т., Полторыхина С.В., Сайдашева В.А., Хабибулина А.Г., Рабазанова А.А. Формирование синтетического критерия классификации в ABC анализе как фактор, влияющий на деятельность и результаты компаний // *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2018. Т. 7. № 10. С. 69–76.
5. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В., Трескова Н.В. Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий: Учебник. М.: АСВ, 2005. 472 с.
6. Красникова Н.М., Некрасов А.Б., Минниханова А.И. Положительные стороны нацпроекта по производительности труда на примере Казанского ДСК // *Жилищное строительство*. 2021. № 5. С. 19–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-5-19-21>

References

1. Ismagilova E.R., Shakirov A.T. Improvement of activities in the storage system. *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh (NAU)*. 2021. No. 65, pp. 18–24. (In Russian).
2. Ivanov G.G., Kireeva N.S. *Skladskaya logistika [Warehouse Logistics]*. Moscow: Infra-M. 2020. 192 p.
3. Belozersky A.Yu., Meshalkin V.P. *Osnovy logistiki skladirovaniya [Fundamentals of warehousing logistics]*. Kaluga: Manuscript, 2009. 155 p.
4. Taisheva G.R., Gafurova G.T., Poltorykhina S.V., Saydasheva V.A., Khabibulina A.G., Rabazanova A.A. Formation of a synthetic classification criterion in ABC analysis as a factor influencing the activities and results of companies. *Ekonomika i upravleniye: problemy, resheniya*. 2018. Vol. 7. No. 10, pp. 69–76. (In Russian).
5. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V., Treskova N.V. *Proyektirovaniye predpriyatiy po proizvodstvu stroitel'nykh materialov i izdeliy (uchebnik)*. [Designing enterprises for the production of building materials and products (textbook)]. Moscow: ASV. 2005. 472 p.
6. Krasnikova N.M., Nekrasov A.B., Minnixanova A.I. Positive aspects of the national project on labor productivity on the example of the Kazan DSK. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2021. No. 5, pp. 19–21. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-5-19-21>

А.М. СУЛЕЙМАНОВ, д-р техн. наук, профессор (alfred-sulejmanov@yandex.ru),
А.Р. ШАКИРОВ, инженер (аспирант) (alma-94@mail.ru)

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных углепластиком

Для разработки методов прогнозирования долговечности железобетонных изгибаемых элементов, усиленных системами внешнего армированиями углепластика (СВА), необходимо определить механизмы развития их напряженно-деформированного состояния. В рамках экспериментального исследования разработана методика исследования, требования к экспериментальной установке и к изготовлению образцов. Применяя метод тензометрии, удалось выявить особенности развития ползучести железобетонной балки, усиленной СВА. Зафиксировано, что характер развития деформаций на поверхности бетона и углепластика отличается. Таким образом выявлено, что ползучесть образцов обусловлена своего рода проскальзыванием адгезионного слоя между бетоном и углепластиком. Определена зависимость ползучести от изменения температурных воздействий. Ступенчатое воздействие температуры позволяет увеличить скорость ползучести эпоксидных адгезивов. Полученные результаты послужили основой для разработки метода прогнозирования ползучести систем внешнего армирования с применением углепластиков.

Ключевые слова: система внешнего армирования, СВА, углеволокно, усиление, ползучесть.

Для цитирования: Сулейманов А.М., Шакиров А.Р. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных углепластиком // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 10–17.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-10-17>

A.M. SULEJMANOV, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, (alfred-sulejmanov@yandex.ru),
A.R. SHAKIROV, Engineer (graduate student) (alma-94@mail.ru)
Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, 420043, Kazan, Russian Federation)

Experimental Study of the Stress-Strain State of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber

To develop methods for predicting the durability of reinforced concrete bendable elements strengthened with external carbon fiber reinforcement systems (CBA), it is necessary to determine the mechanisms of their stress-strain state development. Within the framework of the experimental study, the research methodology, requirements for the experimental installation and for the production of samples were developed. Using the strain gauge method, it was possible to identify the features of creep development of a reinforced concrete beams strengthened with CBA. It is fixed that the nature of the development of deformations on the surface of concrete and carbon fiber is different. Thus, it was revealed that the creep of the samples is due to a kind of slip of the adhesive layer between concrete and carbon fiber. The dependence of creep on changes in temperature influences is determined. The stepwise effect of temperature makes it possible to increase the creep rate of epoxy adhesives. The results obtained served as the basis for the development of a method for predicting the creep of external reinforcement systems using carbon fiber.

Keywords: external reinforcement system, carbon fiber, reinforcement, strengthening, creep.

For citation: Sulejmanov A.M., Shakirov A.R. Experimental study of the stress-strain state of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 10–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-10-17>

В современной научной литературе в области систем внешнего армирования накоплено достаточно материала, посвященного методикам расчета и конструирования [1–4], исследованы особенности механического поведения и путей разрушения композиций [4–13]. Но основная часть работ посвящена изучению кратковременных воздействий на конструкции, усиленные системами внешнего армирования композитными материалами. Недостаточно внимания уделено вопросам оценки долговечности СВА, и в этом плане исследования направлены в основном на изучение температурной стойкости при пониженной и высокой температуре, а также морозостойкости системы [14–23].

Железобетонная конструкция, усиленная системой внешнего армирования (СВА), представляет со-

бой единую систему, состоящую из железобетонного изгибаемого элемента и углеродного полотна, установленного на растянутую зону при помощи эпоксидного адгезива. Если сопоставить физико-механические характеристики и долговечность каждого элемента отдельно, то срок службы СВА будет определяться адгезивом, который обладает невысокими показателями механических характеристик и термостойкостью. Необходимо здесь отметить, что при разработке методов испытания на долговечность различных технических систем предельное состояние всей системы определяется по «слабому звену». В то же время, как показывают многочисленные опыты, изложенные в литературе, и собственные экспериментальные исследования, при кратковременных испытаниях на прочность железобетонной конструк-

ции, усиленной СВА, разрушение практически всегда происходит по бетону. Согласно существующим нормативам [1] такой механизм разрушения считается удовлетворительным, поскольку обеспечивается усиление железобетонной конструкции. Очевидно, данный вид разрушения проявляется только при кратковременных испытаниях исходных, не подверженных воздействию эксплуатационных факторов образцов и не позволяет оценить реальные физико-механические характеристики самого адгезива при длительной эксплуатации. При кратковременных испытаниях, независимо от характеристик адгезивов, результат будет зависеть только от сопротивления бетона при растяжении.

Самым чувствительным элементом к длительному воздействию эксплуатационных факторов, прежде всего температуры и механических напряжений, является полимерный адгезив, именно он обеспечивает совместную работу всей системы, и, как показано в исследовании [24], природа адгезионного соединения между бетоном и эпоксидным адгезивом довольно сложная.

Представляет интерес исследование не предельного состояния самой системы, а, вероятно, ее ползучести. В работе [25] показано, что ползучесть железобетонной балки, усиленной СВА, стабилизируется в течение 120 сут. Однако данный эксперимент был проведен при температуре $+20 \pm 2^\circ\text{C}$. Известно, что эпоксидные адгезивы, применяемые на сегодняшний день для СВА, чувствительны к воздействию температуры начиная с 30°C [17, 26]. В зависимости от температуры испытаний меняются физико-механические характеристики и ползучесть адгезивов [27].

В связи со сформулированной научной гипотезой целью настоящей работы является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемого железобетонного элемента, усиленного СВА.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику экспериментальных исследований НДС изгибаемого железобетонного элемента, усиленного СВА.

2. Разработать установку для экспериментальных исследований.

3. Выявить закономерности напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента, усиленного СВА и ее изменения во времени.

Материалы и методы

Моделирование напряженно-деформированного состояния производилось на образцах, представляющих собой железобетонную балку с установленной в растянутой зоне ламелью из углепластика при помощи эпоксидного адгезива. Экспериментальное исследование НДС изгибаемого элемента, усиленного СВА, выполнялось с применением тензометрии. Для выявления механизма развития ползучести необходима фиксация развития деформаций и на углепластике, и на поверхности растянутой зоны бетона. С этой целью ламель устанавливается на образец с отступами по краям вдоль растянутых граней так, чтобы можно было установить тензодатчики на поверхность бетона.

Испытание образца проводилось на четырехточечный изгиб (рис. 2). Для нагружения балок была изготовлена силовая рама 1 (рис. 1). Нагружение проводили с помощью гидравлического домкрата 3 (рис. 1) через траверсу с двухточечным распределением сил на балку. Схема нагружения балки на стенде показана на рис. 1.

Измерение приложенной нагрузки P на траверсу проводили при помощи манометра радиального типа 9 (рис. 1), расположенного на насосе 6 (рис. 1).

Моделирование воздействия температуры производилось в термобарокамере STBV-1000-IV

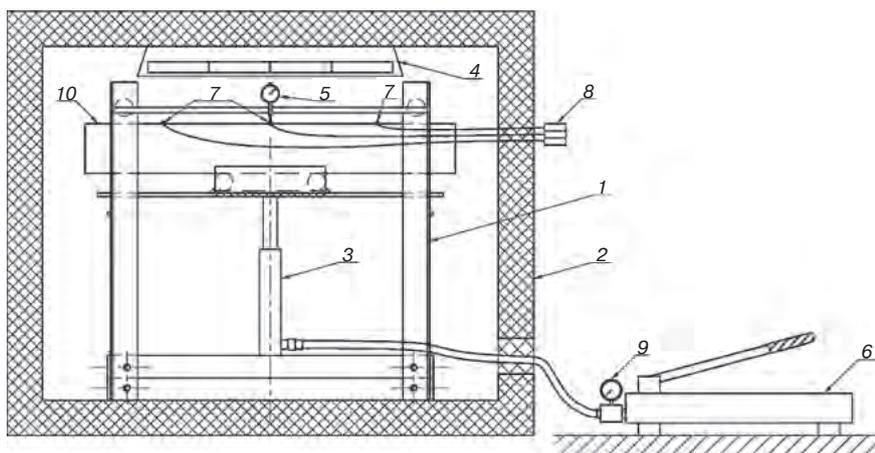


Рис. 1. Схема установки системы нагружения: 1 – силовая рама; 2 – климатическая камера; 3 – гидравлический домкрат; 4 – инфракрасный излучатель; 5 – индикатор часового типа; 6 – гидравлический насос; 7 – точки вставки термопар; 8 – блок индикаторов термопар; 9 – манометр; 10 – испытуемый образец

Fig. 1. Loading system installation scheme: 1 – power frame; 2 – climate chamber; 3 – hydraulic jack; 4 – infrared emitter; 5 – clock type indicator; 6 – hydraulic pump; 7 – thermocouple insertion points; 8 – thermocouple indicator block; 9 – pressure gauge; 10 – test sample

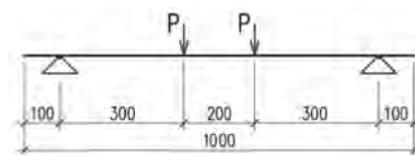


Рис. 2. Схема нагружения
Fig. 2. Loading scheme



Рис. 3. Опалубочный чертеж и армирование балки

Fig. 3. Formwork drawing and beam reinforcement

(ILKA) 2 (рис. 1). Однако нагревание массивного железобетонного образца с тонким слоем углеродной ламели на эпоксидном адгезиве конвекционным способом недопустимо. Так как при данном способе передачи температуры большое количество тепловой энергии затрачивается на прогрев объема бетона, отсутствует возможность равномерного прогрева слоя эпоксидного адгезива и существенно увеличивается время прогрева. При данных условиях возникает риск образования структурных изменений в эпоксидном адгезиве от длительного воздействия температуры при нагреве. Это, в свою очередь, влияет на чистоту эксперимента. Принимая во внимание, что температурный интервал эксперимента не влияет на свойства железобетона для прогрева адгезионного слоя, применен инфракрасный излучатель 4 (рис. 1). Это позволило ускорить время прогрева до 5 минут. Для контроля температуры в адгезионном слое под углепластик вживлялись термометры 7 (рис. 1).

Для проведения испытаний были изготовлены опытные образцы балки прямоугольного сечения шириной 120, высотой 140, общей длиной 1000 мм. Армирование балок выполнено в нижней зоне двумя отдельными стержнями диаметром 8 мм А400 длиной 1000 мм (рис. 3).

В растянутой зоне балку усилили одним слоем ламели из ткани углеродными волокнами FibArm Tape 230/300. Ламель устанавливалась так, чтобы избежать защемления между опорами и железобетонной балкой. Для обеспечения возможности установки тензодатчиков в растянутой зоне балки и на бетонное основание, и на углепластик по ширине балки ламель устанавливалась с отступлением по 20 мм. На основании вышесказанного ширина ламели принята равной 80 мм, длина – 700 мм. Углеродные ламели устанавливались при помощи двухкомпонентной системы на эпоксидной основе – FibArm Resin 230+. Схема усиления приведена на рис. 4.

Для измерения прогибов в середине пролета балки использовались индикаторы часового типа

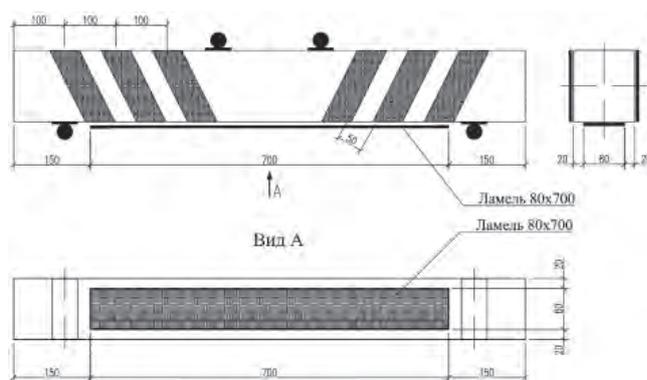


Рис. 4. Схема усиления балки
Fig. 4. Beam reinforcement scheme

ИЧ10-0.01 5 (рис. 1). Для измерения деформаций на балку приклеивались тензодатчики. Показания приборов снимались при помощи автоматического измерителя деформаций АИД-4. Схема установки тензодатчиков приведена на рис. 5. Для определения характера работы балки, усиленной СВА, тензодатчики были приклеены и на бетонную поверхность балки, и на поверхность углепластика.

Для испытаний изготовлены две одинаковые балки – Б-1, Б-2. Были проведены две серии экспериментальных испытаний. Далее описаны режимы испытаний.

Нагружение для всех балок производилось ступенями по одному делению на манометре насоса, что соответствует 324 кг.

После приложения доли нагрузки образец выдерживался 10 мин, во время которых производился осмотр балок на образование трещин, снятие показаний деформаций и прогибов.

Испытание на прочность проводилось по ГОСТ 8829–94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости» на балке Б-1 в следующем порядке:



Рис. 5. Схема расположения тензодатчиков (ТД-20 – тензодатчик с базой 20 мм; ТД-50 – тензодатчик с базой 50 мм)

Fig. 5. The layout of the load cells (TD-20 is a load cell with a base of 20 mm; TD-50 is a load cell with a base of 50 mm)





Рис. 6. Разрушение балки
Fig. 6. Destruction of the beam

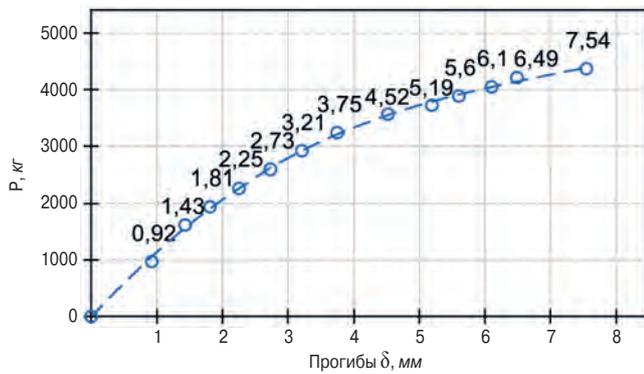


Рис. 7. График зависимости прогибов от нагрузки
Fig. 7. The graph of the deflection dependence on the load

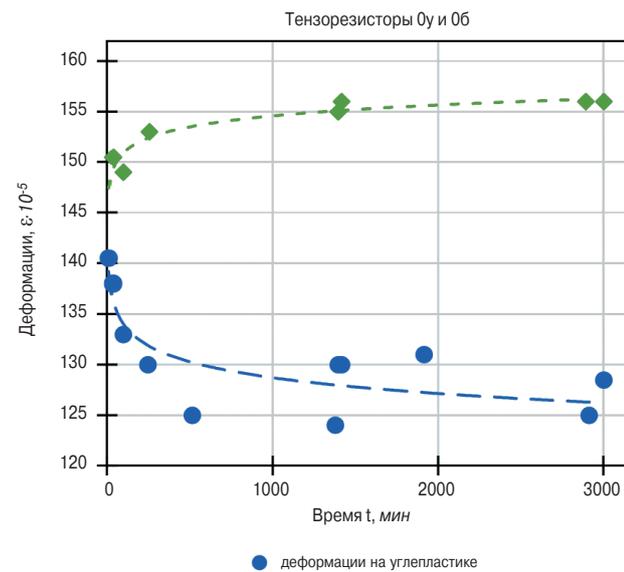


Рис. 9. График ползучести деформаций при температуре $T_1=20^\circ$
Fig. 9. Graph of creep deformations at a temperature $T_1=20^\circ$

1. Образец устанавливался в лабораторный стенд.
2. Устанавливались измерительные приборы (ИЧ).
3. Нагружение производилось ступенчато до разрушения балки.

4. Каждую ступень выдерживали 10 мин, во время которых производился осмотр балок, снятие показаний деформаций и прогибов.

Испытание балки Б-2 на ползучесть при воздействии температуры проводилось при нагрузке, равной 50% от разрушающей, в следующем порядке:

1. Образец устанавливался в лабораторный стенд, помещенный в термобарокамеру STBV-1000-IV (ILKA).

2. Устанавливались измерительные приборы (ИЧ).

3. Производилось нагружение при температуре 20°C по аналогии с балкой Б-1 до 50% от разрушающей.

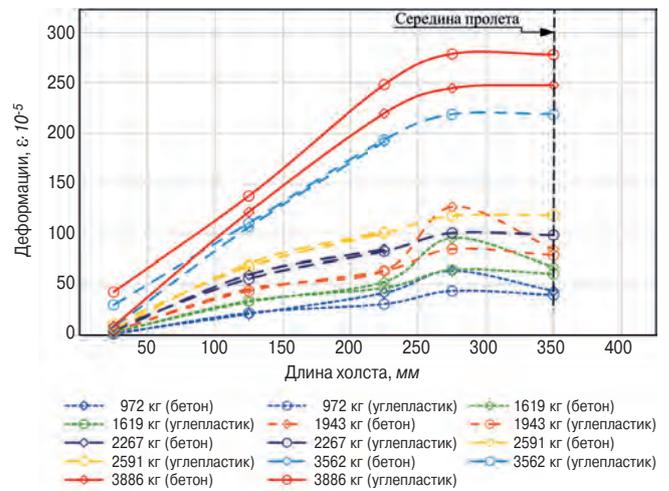
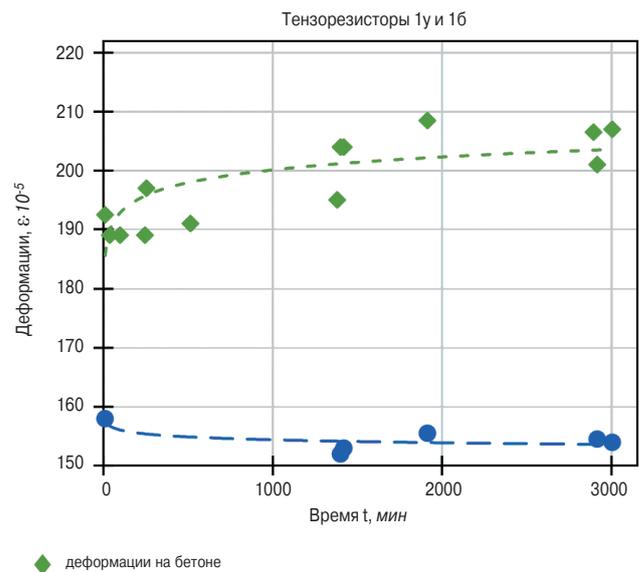


Рис. 8. Сравнительный график распределения деформаций на половине длины зоны усиления по поверхности бетона и углепластика

Fig. 8. Comparative graph of the distribution of deformations at half the length of the reinforcement zone on the surface of concrete and carbon fiber



4. Балка выдерживалась под нагрузкой при 20°C 2 сут, в течение которых фиксировались показания с приборов через определенные промежутки времени.

5. Повышалась температура на 10°C. При данной и последующих температурах балка выдерживалась 1 сут, в течение которых фиксировались показания приборов через определенные промежутки времени.

6. Повышение температуры происходило до 90°C.

Результаты

По результатам первого испытания балка Б-1 разрушилась при нагрузке $P_{разр}=4372$ кг. Разрушение балки произошло отрывом бетона (рис. 6). Предельное значение прогиба составило 7,54 мм (рис. 7).

Как показали тензометрические данные, при статическом нагружении деформации на поверхности бетона и углепластика совпадают. Лишь при критических нагрузках, близких к разрушающим (более 85% $P_{разр}$), наблюдаются отличия деформаций. При этом деформации на углепластике больше, чем на бетоне (рис. 8).

Начальный прогиб балки Б-2 при нагрузке 2186 кг (50% от $P_{разр}$) и температуре испытаний $T_1=20^\circ$ составил 1,87 мм. Для анализа напряженно-деформированного состояния балки Б-2 выбраны тензометрические данные для температурного режима испытаний $T_1=20^\circ$ (рис. 9). Как видно из рис. 9, деформации растяжения на бетоне выше деформаций на углепластике. В то же время деформации на бетоне с течением времени только увеличиваются, а на углепластике, наоборот, уменьшаются. При этом из рис. 8 видно, что в приопорных зонах деформации практически одинаковы.

В режиме ползучести деформации балки постепенно уменьшаются, стремясь к стабилизации. Это видно и по тензометрическим показаниям (рис. 10), и по графику ползучести прогиба балки (рис. 11). Однако, как следует из графика на рис. 11, повышение температуры приводит к ускорению ползучести. Таким образом, при ступенчатом повышении температуры испытаний через определенный интервал времени график прогиба балки имеет форму ступенчатых изотерм. Изотермы для всей температуры идут плавно, без резких скачков.

При температуре испытаний 80° произошло разрушение образца с отслоением углепластика вследствие деструкции эпоксидного адгезива (рис. 12).

Обсуждение

Анализ тензометрических данных показал, что деформации на поверхности бетона больше, чем на поверхности углепластика. При этом в режиме ползучести деформации на бетоне интенсивно растут, а на углепластике, наоборот, уменьшаются. Такое развитие деформаций в режиме ползучести показывает, что ползучесть железобетонной балки, усиленной

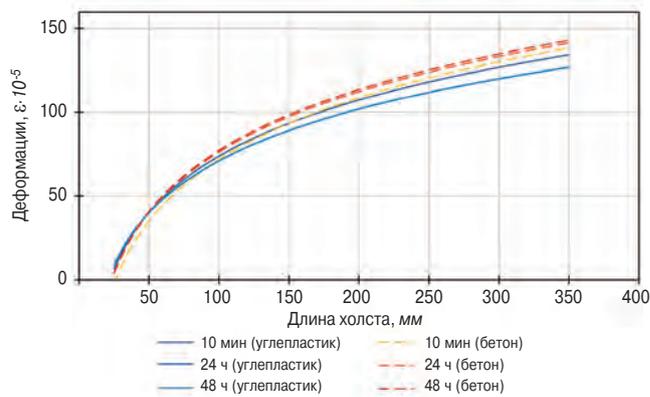


Рис. 10. График распределения деформаций ползучести по длине балки при температуре $T_1=20^\circ$

Fig. 10. A graph of the distribution of creep deformations along the length of the beam at a temperature $T_1=20^\circ$

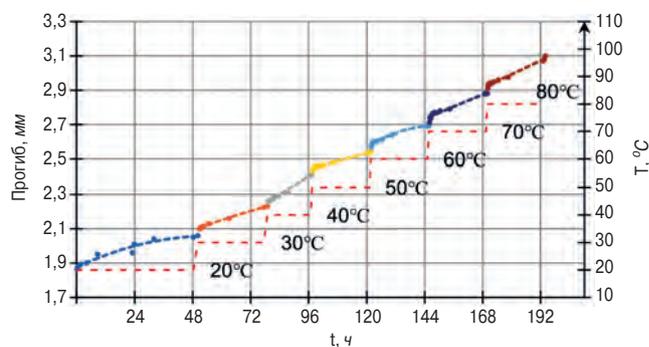


Рис. 11. График ползучести прогиба под ступенчатым воздействием температуры

Fig. 11. Graph of creep deflection under the stepwise influence of temperatures



Рис. 12. Разрушение образца с отслоением углепластика

Fig. 12. Destruction of the sample with the detachment of carbon fiber

СВА из углепластиков с применением эпоксидных связующих, связано с неравномерным сопротивлением углепластика и бетона на растягивающие усилия. При возрастании нагрузки на балку постепенно увеличиваются деформации и напряжения в бетоне и арматуре. При достижении бетоном на растянутой грани предельных деформаций и образовании трещин внутренние усилия перераспределяются между арматурой, бетоном и углепластиком. С достижением предельной нагрузки для самой железобетонной балки практически все растягивающие усилия воспринимает углепластик через адгезионное соединение. Из-за образовавшихся трещин в растянутой зоне бетона деформации растяжения в железобетонной балке растут. В то же время обладающий значи-

тельно превосходящими железобетон характеристиками прочности на растяжение, модулем упругости и низкой деформативностью углепластик оказывает огромное сопротивление растяжению, практически отрывая адгезионный слой с поверхности бетона. В свою очередь, в тонком слое эпоксидного адгезива образуются пластические деформации. Это приводит к своего рода проскальзыванию адгезионного слоя между бетоном и углепластиком.

Ползучесть железобетонной балки, усиленной СВА, стремится к стабилизации. Однако она чувствительна к температурам. Увеличение температуры испытания приводит к ускорению ползучести. Если не превышать температуру стеклования для эпоксидного адгезива, реологическое поведение системы, состоящей из железобетонной балки, усиленной СВА из углепластиков при помощи эпоксидного адгезива, при заданной нагрузке протекает одинаково для всех температур испытания. В дальнейшем такое поведение образцов при ступенчатом повышении температуры удобно применить для разработки ме-

тодики по ускоренной оценке ползучести методом температурно-временной аналогии.

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования двух серий образцов железобетонных балок, усиленных СВА, в условиях кратковременного и длительного статического нагружения позволили установить следующие основные результаты:

1. Анализ тензометрических данных показал закономерности развития ползучести, позволил оценить механизм развития ползучести под действием постоянной нагрузки. Результаты показали, что ползучесть железобетонного элемента, усиленного СВА, обусловлена ползучестью адгезива.

2. Полученные закономерности НДС конструкции показали сильную функцию от уровней температуры и механических нагрузок, что позволило определиться с выбором прогностического аппарата для оценки долговечности СВА в железобетонных конструкциях.

Список литературы

1. Лесовик Р.В., Ключев С.В. Расчет усиления железобетонных колонн углеродной тканью. *Инновационные материалы технологии; сборник докладов Международной научно-практической конференции*. Белгород, 11–12 октября 2011 г. Ч. 2. С. 3–5.
2. СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами». 2015.
3. Ключев С.В., Рубанов В.Г., Павленко В.И., Гурьянов Ю.В., Гинзбург А.В. Расчет строительных конструкций, усиленных углеволокном // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. № 5. С. 54–56.
4. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 181 с.
5. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // *Известия вузов. Строительство*. 2010. № 2. С. 112–124.
6. Ключев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна // *Бетон и железобетон*. 2012. № 3. С. 23–26.
7. Неровных А.А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013. 201 с.

References

1. Lesovik R.S., Klyuev S.S. Expansion of reinforcement of yellow concrete columns corner fabric. *Innovative technological materials; collection of doctors of the International Scientific and Practical Conference*. Belgorod, October 11–12. Part. 2, pp. 3–5. (In Russian).
2. SP 164.1325800.2014 “Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials”. 2015. (In Russian).
3. Klyuev S.V., Rubanov V.G., Pavlenko V.I., Guryanov Yu.V., Ginzburg A.V. Calculation of carbon fiber reinforced building structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013. No. 5, pp. 54–56. (In Russian).
4. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnykh konstrukcij kompozicionnymi materialami [External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials]. Moscow: Stroyizdat, 2007. 181 p.
5. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Experimental studies of bent reinforced concrete elements reinforced with composite materials. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2010. No. 2, pp. 112–124. (In Russian).
6. Klyuev S.V. Strengthening and restoration of structures using carbon fiber-based composites. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2012. No. 3, pp. 23–26. (In Russian).
7. Nerovnykh A.A. Improving the methodology for assessing the load capacity of reinforced concrete superstructures of railway bridges reinforced with composite materials. Diss... Candidate of Sciences (Engineering). Novosibirsk. 2013. 201 p. (In Russian).

8. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2012. № 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/13tvn412.pdf>
9. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Анализ проблем усиления железобетонных конструкций композитными материалами. *Развитие транспорта в регионах России: проблемы и перспективы: Материалы II Всероссийской конференции с международным участием*. Киров, 2012. С. 49–52.
10. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч. 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2016. Т. 8. № 3. <http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf>
11. Bonacci, J.F., Maalej, M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2000. 97 (5), pp. 703–11.
12. Denvid Lau, Hoat Joen Pam. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32, pp. 3857–3865.
13. Sólrún Lovísa Sveinsdóttir. Experimental research on strengthening of concrete beams by the use of epoxy adhesive and cement-based bonding material. School of Science and Engineering at Reykjavik University. Thesis in Civil Engineering for the degree of Master of Science. 2012. 108 p.
14. Бокарев С.А., Неровных А.А., Смердов Д.Н. Стойкость изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных композиционными материалами на основании углеродного волокна, к воздействию отрицательных и положительных температур. *Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе. Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию Сибирского государственного университета путей сообщения. Тезисы конференции*. Ч. 1. Новосибирск, 2012. С. 127–128.
15. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2013. № 3 (16). С. 1–9.
16. Испытания на долговечность железобетонных конструкций, усиленных системой FibARM. ЗАО «ХК «Композит», 2016. 35 с.
17. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ эксперимен-
8. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinoviev V.S., Umirov A.D. Issues of reinforcement of reinforced concrete structures with composites: 1. Experimental studies of the features of reinforcement by composites of bent reinforced concrete structures. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2012. No. 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/13tvn412.pdf> (In Russian).
9. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinoviev V.S., Amirov A.D. Analysis of problems of reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. *Transport development in the regions of Russia: problems and prospects. Materials of the II All-Russian Conference with international participation*. Kirov. 2012, pp. 49–52. (In Russian).
10. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhalkin E.S. Analysis of experimental studies on strengthening reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments with static loading. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2016. Vol. 8. No. 3. <http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf> (In Russian).
11. Bonacci, J.F., Maalej, M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2000. 97 (5), pp. 703–11.
12. Denvid Lau, Hoat Joen Pam. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32, pp. 3857–3865.
13. Sólrún Lovísa Sveinsdóttir. Experimental research on strengthening of concrete beams by the use of epoxy adhesive and cement-based bonding material. School of Science and Engineering at Reykjavik University. Thesis in Civil Engineering for the degree of Master of Science. 2012. 108 p.
14. Bokarev S.A., Nerovnykh A.A., Smerdov D.N. Resistance of bent reinforced concrete structures reinforced with composite materials based on carbon fiber to the effects of negative and positive temperatures. *Innovative factors of Transsib development at the present stage. International scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Siberian State University of Railways. Abstracts of the conference*. Part I. Novosibirsk. 2012, pp. 127–128. (In Russian).
15. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Experimental studies at low and elevated temperatures of reinforced concrete samples reinforced with polymer composite materials. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2013. No. 3 (16), pp. 1–9. (In Russian).
16. Durability tests of reinforced concrete structures reinforced with the FibARM system. «Kompozit». 2016. 35 p. (In Russian).
17. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhalkin E.S. Analysis of experimental studies on strengthening reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 2. Influence of

- тальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч. 2. Влияние температуры // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2016. Т. 8. № 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf>
18. Смердов Д.Н. Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композитными материалами: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск. 2010. 158 с.
 19. Смердов М.Н. Исследование несущей способности железобетонных конструкций гидротехнических зданий и сооружений, усиленных композиционными материалами, с учетом температурных факторов: Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2015. 135 с.
 20. Salamaa A.E., Ghanema G.M., Abd-Elnabya S.F., El-Hefnawyb A.A., AbdElghaffarb M. Behavior of thermally protected RC beams strengthened with CFRP under dual effect of elevated temperature and loading. *HBRC Journal*. Vol. 8. Iss. 1. 2012, pp. 26–35.
 21. Burke P.J., Bisby L.A., Green M.F. Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 35. Iss. 1, pp. 190–199 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.003>
 22. Petkova D. and Donchev T. Residual strength of CFRP strengthened beams after heating and cooling. *In: Concrete Solutions 2011. 4th International Conference on Concrete Repair*. 26–28 September 2011. Dresden, Germany.
 23. Liu S, Pan Y, Li H, Xian G. Durability of the bond between CFRP and concrete exposed to thermal cycles. *Materials (Basel)*. 2019. 8; 12(3):515. doi: 10.3390/ma12030515
 24. Djouani Fatma, Connan Carole, Delamar Michel, Chehimi Mohamed, Benzarti Karim. Cement paste-epoxy adhesive interactions. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, pp. 411–423. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.035
 25. Селиванова Е.О., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования ползучести в композиционных материалах, усиливающих изгибаемые железобетонные элементы. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2017. № 2.
 26. Сулейманов А.М., Шакиров А.Р., Аглиуллина А.Ф., Старовойтова И.А. Исследование кратковременной и длительной прочности адгезионных клеевых соединений для устройства систем внешнего армирования строительных конструкций / *Известия КГАСУ*. 2018. № 4 (46).
 27. Houhou N., Benzarti Karim, Quiertant M., Chataigner Sylvain, Fléty A., Marty C. Analysis of the nonlinear creep behavior of concrete/FRP-bonded assemblies. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2014. 28, pp. 1345–1366. DOI: 10.1080/01694243.2012.697387
 - temperature. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2016. Vol. 8. No. 4 <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (In Russian).
 18. Smerdov D.N. Assessment of the load-bearing capacity of reinforced concrete bridge spans reinforced with composite materials. Diss. Candidate of Sciences (Engineering). Novosibirsk. 2010. 158 p. (In Russian).
 19. Smerdov M.N. Investigation of the bearing capacity of reinforced concrete structures of hydraulic engineering buildings and structures reinforced with composite materials, taking into account temperature factors. Diss. Candidate of Sciences (Engineering). Yekaterinburg. 2015. 135 p. (In Russian).
 20. Salamaa A.E., Ghanema G.M., Abd-Elnabya S.F., El-Hefnawyb A.A., AbdElghaffarb M. Behavior of thermally protected RC beams strengthened with CFRP under dual effect of elevated temperature and loading. *HBRC Journal*. Vol. 8. Iss. 1. 2012, pp. 26–35.
 21. Burke P.J., Bisby L.A., Green M.F. Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 35. Iss. 1, pp. 190–199 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.003>
 22. Petkova D. and Donchev T. Residual strength of CFRP strengthened beams after heating and cooling. *In: Concrete Solutions 2011. 4th International Conference on Concrete Repair*. 26–28 September 2011. Dresden, Germany.
 23. Liu S, Pan Y, Li H, Xian G. Durability of the bond between CFRP and concrete exposed to thermal cycles. *Materials (Basel)*. 2019. 8; 12(3):515. doi: 10.3390/ma12030515
 24. Djouani Fatma, Connan Carole, Delamar Michel, Chehimi Mohamed, Benzarti Karim. Cement paste-epoxy adhesive interactions. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, pp. 411–423. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.035
 25. Selivanova E.O., Smerdov D.N. Experimental studies of creep in composite materials reinforcing bent reinforced concrete elements. *Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN*. 2017. No. 2. (In Russian).
 26. Suleymanov A.M., Shakirov A.R., Agliullina A.F., Starovoitova I.A. Investigation of short-term and long-term strength of adhesive joints for the device of external reinforcement systems of building structures. *Izvestiya KGASU*. 2018. No. 4 (46). (In Russian).
 27. Houhou N., Benzarti Karim, Quiertant M., Chataigner Sylvain, Fléty A., Marty C. Analysis of the nonlinear creep behavior of concrete/FRP-bonded assemblies. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2014. 28, pp. 1345–1366. DOI: 10.1080/01694243.2012.697387

Производственная гибкость и многофункциональность современных технологических комплексов по изготовлению сборного железобетона

Любое современное предприятие стройиндустрии железобетона должно быть хорошо оснащенным для гибкого решения производственных задач с быстрым переходом от изготовления одних изделий на другие. Это одна из фундаментальных основ, способствующих экономическому выживанию и коммерческому развитию производителей железобетонных изделий (жби) в постоянно меняющихся условиях рынка строительных материалов и при строительстве зданий и сооружений.

Приволжский Центр Строительные Технологии — компания, более 20 лет занимающаяся проектированием, модернизацией и оснащением «под ключ» заводов ЖБИ, ДСК, КПД.



Приволжский Центр Строительные Технологии поставляет «под ключ» производственные комплексы, в эксплуатационных и производственных характеристиках и качествах которых полностью уверены специалисты. Они гармонично вписывают новые техпроцессы в существующий рабочий цикл предприятий или создают их полностью с нуля. В процессе проектирования разрабатываются компьютерные 3D-модели как наглядная визуализация будущих производств. Оборудование располагается таким образом, чтобы оно успешно функционировало в штатном режиме, давая возможность продуктивной работы, удобного обслуживания, и занимало ровно столько рабочего пространства, сколько нужно для соблюдения условий эффективности и безопасности эксплуатации.

На объекты всегда выезжают бригады специалистов компании для выполнения полного объема монтажных и пусконаладочных работ, это не только позволяет запускать оборудование быстро и качественно, но и гарантирует в дальнейшем его долговременную службу. Компания разрабатывает рекомендации по ведению технологических процессов и эксплуатации оборудования и помогает их придерживаться. Производим и осуществляем сервисные поставки расходных материалов и комплектующих. Причем это касается сервиса не только оборудования Приволжского Центра Строительных Технологий, но и других производителей.

Основные направления деятельности Приволжского Центра Строительных Технологий:

— **ЛБФ Лента** – безопалубочное изготовление жби на длинных формовочных дорожках. Это самый современный и высокотехнологичный способ поточного изготовления





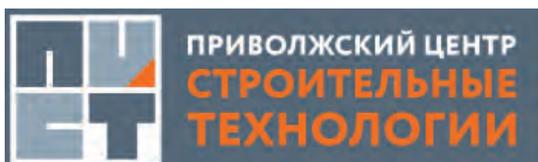
погонажных жби, особенно актуален для выпуска пустотных плит перекрытия. Почти за 30 лет присутствия на заводах России и стран СНГ этот метод формования практически вытеснил устаревший агрегатно-поточный и зарекомендовал себя высокой производительностью и автоматизацией. Он более удобен за счет отсутствия необходимости в арматурном участке и способности быстрого перехода с выпуска одного вида или типоразмера изделий на другой. Включает в себя формовочные дорожки/настилы и машины, выполняющие подготовительные этапы по чистке, смазке, армированию и преднапряжению будущих изделий, формованию единого массива изделия с его укрытием для прогрева и последующей распиловкой на индивидуальные изделия;

— **УТС Основа** — универсальные и специализированные (унифицированные под определенный вид изделий) термостенды для изготовления различных жби, как ненапряженных, так и преднапряженных (ригели, колонны, сваи, панели, дорожные плиты и пр.). УТС Основа — эффективный многофункциональный инструмент, совмещающий в себе экономичную тепловую обработку, высокоточную формовочную поверхность, кронштейны для использования различной опалубки и механизированные технологические устройства, облегчающие доставку бетонной смеси и ее укладку. Термостенды являются сбалансированным средством производства железобетона — единым технологическим пространством, где все операции по армированию, формованию и тепловой обработке проводятся без перемещения оснастки с изделием. Термостенд, оснащенный силовыми упорами и специальной гидравликой, становится еще более мультифункциональным за счет возможности выпуска преднапряженных ригелей, балок, плит.

— сопутствующее этим производственным направлениям **оборудование для доставки и укладки бетонной смеси** — адресная подача бетонной смеси с кубелями-бетоновозами БТНВ, формовочная оснастка, бетоноукладчики ВБУ. Автоматизированные кубели-бетоновозы, перемещающиеся по собственным подвесным путям, значительно увеличивают скорость подачи бетонной смеси от БСУ до формовочного пролета. Бетоноукладчики ВБУ,двигающиеся вдоль стенов по своим рельсам, работают в паре с ними, принимая смесь сразу из кубеля, без отвлечения мостового крана, и укладывают ее в оснастку на термостендах. Так задачи доставки и формования каждого замеса решаются быстро, безопасно и под оперативным контролем оператора оборудования.

Важное значение в безопалубочных и стендовых линиях специалисты Приволжского Центра Строительных Технологий уделяют автоматической тепловой обработке изделий. Для созревания бетона и достижения им необходимой прочности все формовочные дорожки и термостенды оснащаются тепловыми узлами с автоматическим управлением. АСУ ТО ТС представляет собой энергосберегающий комплекс инженерных приемов, средств контроля и управления теплоносителем. Такая совокупность дает возможность прогревать как тонкостенные, так и массивные железобетонные изделия.

В нашем деле важен баланс надежности, удобства, производительности и безопасности — все это мы собрали в своей компании!



РФ, Республика Татарстан, 420034,
г. Казань, ул. Тверская, д. 9Б, оф. 12
тел: 8-800-600-47-13 www.pc-st.ru
st-volga@bk.ru info@pc-st.ru



С.В. СОКОЛОВА¹, канд. техн. наук, доцент (sokolova9967@mail.ru);
М.Н. БАРАНОВА², канд. техн. наук, доцент (mnbaranova@yandex.ru),
Д.И. ВАСИЛЬЕВА², канд. биол. наук, доцент (vasilievadi@mail.ru);
Ю.А. ХОЛОПОВ¹, канд. с.-х. наук, доцент (kholopov@bk.ru)

¹ Самарский государственный университет путей сообщения (443066, г. Самара, ул. Свободы, 2В)

² Самарский государственный технический университет (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

Вторичное использование глиноземсодержащих отходов промышленности для синтеза жаростойких бетонов

Рассмотрена возможность вторичного использования отходов (шлама), полученных на Самарском металлургическом заводе, за счет синтеза на их основе вяжущих компонентов для жаростойких бетонов. Изучен состав и свойства тонкомолотого огнеупорного компонента высокоглиноземистого шамота. Приводится химический состав тонкомолотого шамота, рентгенограмма алюмокальциевого шлама. Описаны структуры цементного камня на жидкостекольных вяжущих при силикатнатриевом (Na_2SiF_6) отвердителе и алюмокальциевом отвердителе с добавками изученного шамота. Доказано, что состав и свойства шлама, который образуется в виде отходов на Самарском металлургическом заводе, позволяют синтезировать жидкостекольные вяжущие на его основе. Наибольший рост прочности отмечается для составов жидкостекольных композиций с отвердителями, в которых присутствуют алюминаты кальция. Петрографическое исследование структуры и новообразований у образцов жаростойких жидкостекольных вяжущих, модифицированных тонкомолотым шамотом, показало уплотнение структуры и армирование аморфной составляющей новообразующими кристаллами. Полученные материалы могут эффективно использоваться для получения строительных материалов вместо направления промышленных отходов на полигоны для захоронения.

Ключевые слова: вторичное использование отходов, глиноземсодержащие отходы, алюмокальциевый шлам, жаростойкие бетоны, жаростойкие вяжущие, экологичность.

Для цитирования: Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А. Вторичное использование глиноземсодержащих отходов промышленности для синтеза жаростойких бетонов // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 20–23.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-20-23>

S.V. SOKOLOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (sokolova9967@mail.ru);

M.N. BARANOVA², Candidate of Sciences (Engineering) (mnbaranova@yandex.ru),

D.I. VASILIEVA², Candidate of Sciences (Biology) (vasilievadi@mail.ru);

Y.A. KHOLOPOV¹, Candidate of Sciences (Agricultural) (kholopov@bk.ru)

¹ Samara State University of Communications (2B, Svobody Street, Samara, 443066, Russian Federation)

² Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation)

Recycling of Alumina-Containing Industrial Waste for the Synthesis of Heat-Resistant Concrete

The possibility of secondary use of waste (sludge) obtained at the Samara Metallurgical Plant due to the synthesis of binder components for heat-resistant concrete on their basis is considered. The composition and properties of the finely ground refractory component of high-alumina chamotte have been studied. The chemical composition of finely ground chamotte, an X-ray of alumocalcium sludge is given. The structures of cement stone on liquid-glass binders with a silicate sodium (Na_2SiF_6) hardener and an alumocalcium hardener with additives of the studied chamotte are described. It is proved that the composition and properties of the sludge, which is formed in the form of waste at the Samara Metallurgical Plant, makes it possible to synthesize liquid-glass binders based on it. The greatest increase in strength is noted for compositions of liquid glass compositions with hardeners in which calcium aluminates are present. Petrographic study of the structure and neoplasms in samples of heat-resistant liquid-glass binders modified with finely ground chamotte showed compaction of the structure and reinforcement of the amorphous component with new-forming crystals. The obtained materials can be effectively used to obtain construction materials instead of sending industrial waste to landfills for disposal.

Keywords: recycling of waste, alumina-containing waste, alumocalcium sludge, heat-resistant concrete, heat-resistant binders.

For citation: Sokolova S.V., Baranova M.N., Vasilieva D.I., Kholopov Y.A. Recycling of alumina-containing industrial waste for the synthesis of heat-resistant concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 20–23. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-20-23>

Вторичное использование отходов, образующихся в результате промышленного производства, является эффективным способом снижения негативного воздействия на окружающую среду. Складирование отходов промышленности на полигонах приводит к необратимому загрязнению земель и невозможности их последующего использования. Кроме того, перенос загрязняющих веществ может способствовать ухудшению состояния окружающих земель, подземных и поверхностных вод и других компонентов экосистем.

Самарская область является промышленно развитым регионом; вклад в образование промышленных отходов вносят предприятия автомобилестроения, химической, нефтехимической, металлургической и других видов промышленности. По данным Государственного доклада об экологической ситуации в Самарской области за 2021 г., всего в регионе было образовано 4079,49 тыс. т отходов, в том числе промышленных отходов – 2783,68 тыс. т (68%) [1]. Следует отметить, что за последние пять лет произ-

ходит постепенное снижение образования промышленных отходов с 3800,1 тыс. т (в 2017 г.). При этом увеличиваются объемы утилизированных отходов и уменьшаются объемы отходов, переданных на захоронение [1]. Для Самарского региона, как и для других промышленно развитых территорий, проблема вторичного использования отходов промышленно-сти является очень актуальной.

В последние годы возросло количество исследований, посвященных вторичному использованию промышленных отходов в строительстве, поскольку это позволяет не только уменьшить объем отходов, размещаемых на полигонах, но и в значительной мере снизить стоимость строительных материалов [2–7]. Поиск новых методов вторичного использования промышленных отходов является актуальной задачей. Рассмотрение номенклатуры строительных материалов показывает, что одним из перспективных материалов является вяжущее для производства бетонов. Целью представленного исследования было изучение возможностей вторичного использования промышленных отходов в виде шлама для создания вяжущего жаростойкого бетона (на примере шлама Самарского металлургического завода). Для достижения цели были поставлены задачи: изучить химический состав и свойства шлама, который образуется в виде отходов на Самарском металлургическом заводе, и жидкостекольных вяжущих на его основе; проанализировать прочностные свойства жаростойкого шамотного бетона на жидком стекле при различном расходе алюмокальциевого шлама и разной температуре обжига; провести петрографическое исследование структуры и новообразований у образцов жаростойких жидкостекольных вяжущих, модифицированных тонкомолотым шамотом.

Проведено изучение применения промышленных отходов, образовавшихся на Самарском металлургическом заводе, для синтеза активного жидкостекольного вяжущего. Использовался высокоглиноземистый тонкомолотый огнеупорный компонент высокоглиноземистый шамот. В табл. 1 приведен химический состав тонкомолотого шамота [8].

Отвердителями жидкостекольных вяжущих служили обожженный алюмокальциевый шлам (АКШ), а также глиноземистый цемент (ГЦ).

На Самарском металлургическом заводе функционируют современные сооружения по очистке технических сточных вод. В частности, алюмощелочной шлам с целью нейтрализации смешивается с карбонатным шламом в жидком суспензионном состоянии, а затем после отстоя образующийся осадок от-

Таблица 1
Table 1

Химический состав тонкомолотого шамота
Chemical composition of finely ground chamotte

Шамот тонко- молотый	Химический состав, мас. %						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
	35–40	45–50	2–3	2–3	0–1	0–1	0–0,5

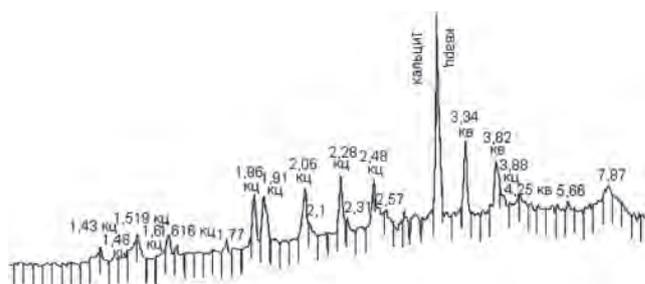


Рис. 1. Рентенограмма алюмокальциевого шлама [9]. Условные обозначения: КЦ – кальцит; КВ – кварц

Fig. 1. Radiograph of alumocalcium sludge [9]. Symbols: КЦ – calcite; КВ – quartz

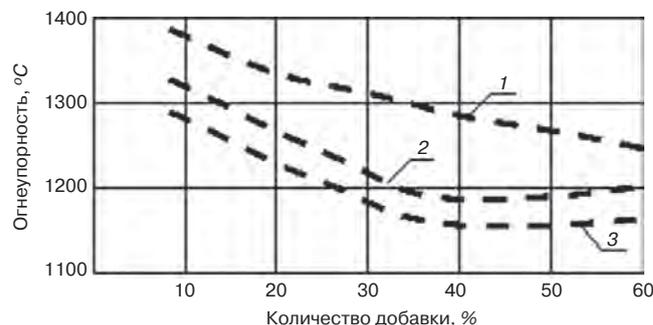


Рис. 2. Огнеупорность жидкостекольных вяжущих композиций в зависимости от количества тонкомолотой добавки: 1 – обожженный алюмокальциевый шлам; 2 – глиноземистый цемент; 3 – Na₂SiF₆ шамот высокоглиноземистый

Fig. 2. Fire resistance of liquid-glass binder compositions depending on the amount of finely ground additive: 1 – burnt alumocalcium slurry; 2 – alumina cement; 3 – Na₂SiF₆ high-alumina chamotte

жимается с помощью фильтр-пресса и отправляется на полигон для захоронения [9, 10].

По условиям образования, значениям удельной поверхности и размеру частиц данный шлам можно отнести к нанотехногенному сырью. Определение наноразмерности карбонатного шлама было проведено в научно-исследовательском институте ядерных исследований (г. Гатчина, Ленинградская обл.). Шлам имеет размерность 40–80 нм. В его химическом составе содержатся в основном оксиды алюминия, кальция и магния (Al₂O₃ 14–20%; CaO 24–28%; MgO 8–10%) и др. [10].

Рентгеновские исследования алюмокальциевого шлама показали присутствие в сырье большого количества кальцита – CaCO₃ (рис. 1).

Начало схватывания таких вяжущих колебалось от 20 до 55 мин. Изменение огнеупорности вяжущего в зависимости от расхода тонкомолотой добавки представлено на рис. 2. Образцы после изготовления хранились без доступа воздуха в течение 1 и 3 сут.

Активность смешанного жидкостекольного вяжущего в композиции с АКШ и ГЦ позволяет получить (табл. 2) жаростойкие бетоны классов В20–В25 по прочности [9].

Для подтверждения полученных показателей у образцов жаростойких жидкостекольных вяжущих, модифицированных тонкомолотым шамотом, были проведены петрографические исследования структуры и новообразований, способствующих улучшению физико-термических характеристик [10].

Таблица 2
Table 2

Предел прочности при сжатии жаростойкого шамотного бетона на жидком стекле, МПа, в зависимости от расхода алюмокальциевого шлама и температуры обжига
Compressive strength of heat-resistant fireclay concrete on liquid glass, МPa, depending on the consumption of alumocalcium sludge and the firing temperature

Расход алюмокальциевого шлама, кг/м ³ смеси	Срок хранения, сут, при t=20°C		Температура обжига, °C						
	3	28	100	400	600	700	800	1000	1100
50	13	30	26	20	23	37	43	40	36
100	25	37	33	25	27	25	40	40	37
150	30	40	30	22	23	36	38	34	37
200	35	44	37	27	26	22	38	30	30
300	31	32	29	20	16	22	23	28	24
400	35	44	36	24	18	33	35	37	38

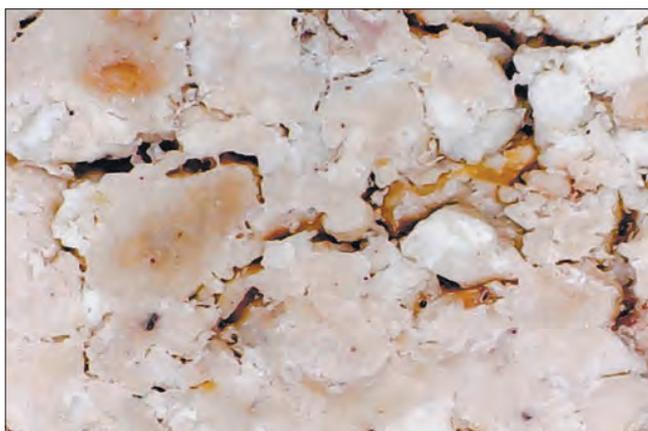


Рис. 3. Микроструктура цементного камня на основе силикатнатриевого вяжущего с высокоглиноземистой добавкой тонкомолотого шамота (микрофото М.Н. Барановой)

Fig. 3. Microstructure of cement stone based on silicate sodium binder with high-alumina additive – finely ground chamotte (microphoto by M.N. Baranova)



Рис. 4. Микроструктура цементного камня на основе алюмокальциевого вяжущего с добавкой тонкомолотого высокоглиноземистого шамота (микрофото М.Н. Барановой)

Fig. 4. Microstructure of cement stone based on alumocalcium binder with the addition of finely ground high-alumina chamotte (microphoto by M.N. Baranova)

Исследования выполнялись на бинокулярном микроскопе в отраженном свете при увеличениях от 12 до 56 крат. Предварительно были изготовлены препараты в виде ровных сколов. Представлены микроскопические снимки структуры цементного камня на жидкостекольных вяжущих при силикатнатриевом (Na_2SiF_6) отвердителе с добавкой тонкомолотого высокоглиноземистого шамота (рис. 3) и на основе алюмокальциевого вяжущего с добавкой тонкомолотого высокоглиноземистого шамота (рис. 4).

Основная масса образца на жидкостекольных вяжущих при силикатнатриевом отвердителе с высокоглиноземистой добавкой имеет светлую окраску с голубоватыми и кремовыми пятнами. Структура представлена зернистой массой с пористостью в виде трещин, зернами шамота в виде неправильных обломков светлого кремового цвета и цементирующей массой белого цвета. Поровое пространство имеет вид четких глубоких пор, чаще изолированных с перегородками в виде тонких перепонок. Размер пор шириной 0,01–0,5 мм, длиной от 1,3 до 6 мм. Поры распределены равномерно, иногда заполнены округлыми зернами мелкой фракции шамота более светлого цвета со стеклянным блеском, что указывает на оплавление и образование стекломассы [11] (рис. 3).

Микроструктура цементного камня на основе алюмокальциевого вяжущего с добавкой тонкомолотого высокоглиноземистого шамота тонкопористая, уплотненная, представлена светло-бежевой массой с участками белого цвета. Зерна шамота имеют тонкую оболочку из связующей массы, имеющей сливную сахаровидную структуру со стеклянным блеском, что указывает на новообразования. В цементирующей массе участками наблюдается голубовато-серое стекло. В белых включениях крупного размера и вокруг зерен шамота наблюдаются четко различимые трещины размером от 0,1 до 0,005 мм. Длина трещин от 1,5 до 0,1 мм. Тонкие поры изолированные прерывистые. Отмечается присутствие редких темных пятен размером в пределах 0,1–0,3 мм, возможно, за счет оксидов железа [11] (рис. 4).

Таким образом, микроструктура цементного камня на основе алюмокальциевого вяжущего с добавкой тонкомолотого высокоглиноземистого шамота приобретает уплотненную структуру за счет заполнения порового пространства стекломассой и кристаллами новообразований в цементирующей массе.

В результате можно сделать следующие выводы.

Во-первых, состав и свойства шлама, который образуется в виде отходов на Самарском металлургиче-

ском заводе, позволяют синтезировать жидкостекольные вяжущие на его основе.

Во-вторых, наибольший рост прочности отмечается для составов жидкостекольных композиций с отвердителями, в которых присутствуют алюминаты кальция.

В-третьих, петрографическое исследование структуры и новообразований у образцов жаростойких жидкостекольных вяжущих, модифицированных тонкомолотым шамотом, показало уплотнение структуры и армирование аморфной составляющей новообразующими кристаллами.

Список литературы

1. Доклад об экологической ситуации в Самарской области за 2021 год. Вып. 32. Самара, 2022. 162 с.
2. Гальцева Н.А., Попов П.В., Котов Д.А. Вторичное использование отходов промышленности // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 5 (89). С. 572–581.
3. Безденежных М.А., Муниева Э.Ю., Жуков А.Д. Строительные материалы и экология // *Перспективы науки*. 2017. № 11 (98). С. 39–42.
4. Иванова Т.А., Колесникова Л.Г. Оценка эффективности применения бетонного лома в качестве крупного заполнителя для бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7530
5. Киянец А.В. Эффективность применения продуктов вторичной переработки полиэтилентерефталата в бетонах // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7487
6. Хлыстов А.И., Соколова С.В., Коннов М.В. Направленная структурно-химическая модификация – один из путей повышения физико-термических характеристик алюмосиликатных и высокоглиноземистых огнеупоров // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2012. № 11. С. 35–39.
7. Хлыстов А.И., Соколова С.В., Баранова М.Н. Совершенствование технологии применения футеровочных пропиточно-обмазочных составов и структурно-химической модификации алюмосиликатных и высокоглиноземистых огнеупоров // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2015. № 10. С. 48–55.
8. Соколова С.В. Структурно-химическая модификация жаростойких композитов. Композиционные материалы: разработка и применение: Монография / Под ред. М.Ю. Звездиной. Новосибирск: АНС «СибАК», 2017. 180 с.
9. Хлыстов А.И. Жаростойкие бетоны на основе отходов промышленности Самарской области: Монография. Самара: АСА СамГТУ, 2017. 171 с.
10. Хлыстов А.И., Соколова С.В., Баранова М.Н. и др. Перспективы использования глиноземосодержащих отходов промышленности в производстве жаростойких бетонов // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 7. С. 13–19. DOI 10.18412/1816-0395-2021-7-13-19
11. Соколова С.В. Синтезирование жаростойких композиций на основе глиноземистых материалов с целью повышения химической сопротивляемости // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2022. № 35. С. 116–119.

References

1. Report on the environmental situation in the Samara region for 2021. Issue 32. Samara, 2022. 162 p. (In Russian).
2. Galtseva N.A., Popov P.V., Kotov D.A. Recycling of industrial waste. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2022. No. 5 (89), pp. 572–581. (In Russian).
3. Bezdenzhnykh M.A., Munieva E.Yu., Zhukov A.D. Building materials and ecology. *Perspektivy nauki*. 2017. No. 11 (98), pp. 39–42. (In Russian).
4. Ivanova T.A., Kolesnikova L.G. Evaluation of the effectiveness of the use of concrete scrap as a coarse aggregate for concrete. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2022. No. 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7530 (In Russian).
5. Kiyants A.V. The effectiveness of the use of polyethylene terephthalate secondary processing products in concretes. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2022. No. 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7487 (In Russian).
6. Khlystov A.I., Sokolova S.V., Konnov M.V. Directed structural-chemical modification is one of the ways to improve the physico-thermal characteristics of aluminosilicate and high-alumina refractories. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2012. No. 11, pp. 35–39. (In Russian).
7. Khlystov A.I., Sokolova S.V., Baranova M.N. Improving the technology of using lining impregnating-coating compositions and structural-chemical modification of aluminosilicate and high-alumina refractories. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2015. No. 10, pp. 48–55. (In Russian).
8. Sokolova S.V. Strukturno-khimicheskaya modifikatsiya zharostoykikh kompozitov. Kompozitsionnyye materialy: razrabotka i primeneniye: monografiya / pod red. M.Yu. Zvezdinoy [Structural and chemical modification of heat-resistant composites. Composite materials: development and application: monograph. Ed. M.Yu. Zvezdina]. Novosibirsk: SibAK. 2017. 180 p.
9. Khlystov A.I. Zharostoykiye betony na osnove otkhodov promyshlennosti Samarskoy oblasti; monografiya [Heat-resistant concretes based on industrial wastes of the Samara region; monograph]. Samara: ASA SamGTU. 2017. 171 p.
10. Khlystov A.I., Sokolova S.V., Baranova M.N. Prospects for the use of alumina-containing industrial waste in the production of heat-resistant concrete. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021. Vol. 25. No. 7, pp. 13–19. (In Russian). DOI 10.18412/1816-0395-2021-7-13-19
11. Sokolova S.V. Synthesis of heat-resistant compositions based on aluminous materials in order to increase chemical resistance. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*. 2022. No. 35, pp. 116–119. (In Russian).

В.Г. ХОЗИН¹, д-р техн. наук (khozin.vadim@yandex.ru);
А.Р. ГИЗДАТУЛЛИН², канд. техн. наук (antonchiks@mail.ru);
И.Т. МИРСАЯПОВ¹, д-р техн. наук (mirsayapov@kgasu.ru);
Р.Р. ЯРУЛЛИН³, инженер (rtm-ingeneriya@mail.ru);
И.В. БОРОВСКИХ¹, канд. техн. наук (borigor83@gmail.com)

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

² ООО «КазИнжПроект» (420015, г. Казань, ул. Жуковского, 9)

³ ООО «РТМ – Инженерия» (422788, Пестречинский р-н, городок Тер. Снт, ул. Нурлатская, 7)

Совместная работа эпоксидного композита и защитного покрытия с цементным бетоном в зоне их адгезионного контакта

В предположении взаимного усиления двух разных по химической природе и механическим свойствам материалов в условии прочного адгезионного контакта, а именно эпоксидного полимера и цементного бетона, проведены экспериментальные исследования бетонных балок, армированных полимеркомпозитной арматурой (ПКА) на эпоксидном связующем, и железобетонных балок с покрытиями поверхностей растянутой зоны из эпоксидной композиции холодного отверждения. Установлено, что в балках, армированных ПКА малых диаметров (с большой удельной поверхностью контакта с бетоном), выше изгибная жесткость и несущая способность, чем в бетонных балках, армированных ПКА больших диаметров с равновеликой суммарной площадью сечения, что объясняется сдерживающим влиянием жесткой бетонной матрицы на деформирование податливого эпоксидного композита в зоне прочного адгезионного контакта. В варианте ЖБ-балок с эпоксидным покрытием растянутой зоны цементный бетон в прилегающей к покрытию зоне (3–4 см от контактной границы) деформируется вместе с покрытием без трещинообразования; трещины зарождаются за пределами 3–4 см полосы при величине изгибающего момента более чем в два раза большей, чем в ЖБ-балках без покрытия, имея ширину раскрытия меньшую в 5–10 раз. Оба эффекта деформационного стеснения целесообразно учитывать при проектировании бетонных изгибаемых конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах.

Ключевые слова: полимеркомпозитная арматура, цементный бетон, балка, эпоксидное покрытие, адгезия, трещиностойкость.

Для цитирования: Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р., Мирсаяпов И.Т., Яруллин Р.Р., Боровских И.В. Совместная работа эпоксидного композита и защитного покрытия с цементным бетоном в зоне их адгезионного контакта // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-24-31>

V.G. KHOZIN¹, Doctor of Sciences (Engineering) (khozin.vadim@yandex.ru); A.R. GIZDATULLIN², Candidate of Sciences (Engineering) (antonchiks@mail.ru); I.T. MIRSAYAPOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (mirsayapov@kgasu.ru); R.R. YARULLIN³, Engineer (rtm-ingeneriya@mail.ru); I.V. BOROVSKIKH¹, Candidate of Sciences (Engineering) (borigor83@gmail.com)

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, Kazan, 420043, Russian Federation)

² "KazInzhProekt" OOO (9, Zhukovskogo Street, Kazan, 420015, Russian Federation)

³ "RTM – Inzheneriya" OOO (7, Nurlatskaya Street, Gorodok Ter. Snt., Pestrechinskii region 422788, Russian Federation)

Combined Action of Epoxy Composite and Protective Coating with Cement Concrete in the Adhesive Contact Zone

Under the assumption of mutual reinforcement of epoxy polymer and cement concrete that are different in chemical nature and mechanical properties in the zone of strong adhesive contact, the concrete beams with the polymer composite reinforcements (PCR) based on the epoxy binder, and the reinforced concrete beams with the cold setting epoxy composite coatings of the tension region surfaces were experimentally studied. It was found that the beams reinforced by PCR with a small diameter (and a large specific surface area of contact with concrete) exhibited a higher bending stiffness and load-bearing capacity compared to that of the concrete beams, which were reinforced by PCR with a large diameter and an equal total cross-sectional area. This effect was attributed to a restraining effect of the rigid concrete matrix on the deformation of the pliable epoxy composite in the zone of strong adhesive contact. In the case of the reinforced concrete beams with the epoxy coatings on the tension region, the cement concrete in the area adjacent to the coating (3–4 cm from the contact boundary) deformed together with the coating without cracking; cracks initiate beyond the 3–4 cm layer at a bending moment more than 2 times greater than in the reinforced concrete beams without any coating, and the crack width was 5–10 times less. Both effects of the deformation restraint should be taken into account when designing concrete bending structures operated in aggressive environments.

Keywords: polymer composite reinforcement, cement concrete, beam, epoxy coating, adhesion, resistance to cracking.

For citation: Khozin V.G., Gizdatullin A.R., Mirsayapov I.T., Yarullin R.R., Borovskikh I.V. Combined action of epoxy composite and protective coating with cement concrete in the adhesive contact zone. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 24–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-24-31>

Говорить о взаимном влиянии двух разных по химической природе твердых тел (материалов) можно только при условии их высокой адгезионной прочности на границе контакта, как правило, превышающей когезионную одного из партнеров (как отмечено в трудах Бикермана и других авторов, разрыв по адгезионному контакту всегда имеет когезионный характер) [1, 2].

Известно [3–5], что эпоксидные полимеры отличаются непревзойденной адгезией к большинству инженерных материалов (металлам, силикатам, керамике, древесине, природным каменным материалам), за исключением неполярных полимеров (полиолефинов, ПЭТ, фторопластов), чистой сере и другим гидрофобным материалам и являются наилучшим

связующим в высокопрочных полимерных композициях, клеях, защитных покрытиях.

Эпоксидные полимеры образуются в результате отверждения, а именно реакций полиприсоединения одноименных реакционноспособных олигомеров – РСО (называемых смолами) с другими реакционноспособными веществами – отвердителями, чаще всего с полиаминами или ангидридами. Смолы, в практике преимущественно диановые, содержат две и более эпоксидные группы на концах молекул, а отвердители тоже полифункциональны, например алифатические полиамины (ПЭПА, ДЭТА, ТЭТА) имеют более двух аминогрупп. Поэтому по химическому строению эпоксиды – гетерополимеры, а по топологической структуре – густосетчатые полимеры с плотностью химических узлов около 10^{21} в 1 см^3 [6, 7]. Например, в широко применяемых эпоксиаминных полимерах на основе диэпоксидов (промышленных смолах типа ЭД-20, Epikote 828 и других аналогах) и первичных аминов (ДЭТА, ПЭПА) химический узел трифункционален, он состоит из двух молекул эпоксидного олигомера и одной – отвердителя, соединенных с центром узла – атомом азота (рис. 1).

Свойства эпоксидных полимеров зависят как от густоты молекулярной сетки, так и от ее химического строения, которое, в свою очередь, определяет энергию межмолекулярного взаимодействия. А она в этих полимерах велика благодаря большому числу полярных групп (гидроксильных, эфирных), ароматических ядер, способных к образованию различных типов физических связей: водородных, ван-дер-ваальсовых и донорно-акцепторных. Единичная энергия этих связей невелика – на один-два порядка меньше энергии ковалентных связей, однако их число в единице объема в 2–4 раза превосходит число химических узлов. Однако физические связи в полимерах имеют термофлуктуационный характер и их энергия интенсивно снижается при повышении температуры. Именно поэтому межмолекулярное взаимодействие обеспечивает эпоксидным полимерам высокие показатели физических свойств в стеклообразном состоянии: плотность, твердость, диэлектрические свойства, стойкость к агрессивным средам, механическую прочность, адгезию, модуль упругости и др. При переходе в высокоэластическое состояние при нагреве до 120–160°C все физико-механические показатели резко снижаются.

Эпоксидные полимеры обладают уникальным комплексом технологических и эксплуатационно-технических свойств. На олигомерной стадии они, будучи полярными, совместимы с огромным числом различных органических продуктов – растворителей, пластификаторов, ПАВ, других РСО, жидких каучуков, а также с отходами органического синтеза, переработки нефти, каменного угля, горючих сланцев. При отверждении эпоксидных смол с растворенными в них продуктами последние до значительных концентраций (10–50%) остаются совместимыми с полимерной сеткой, не выделяясь в дисперсную фазу, что недоступно для других смол: фенольных, поли-

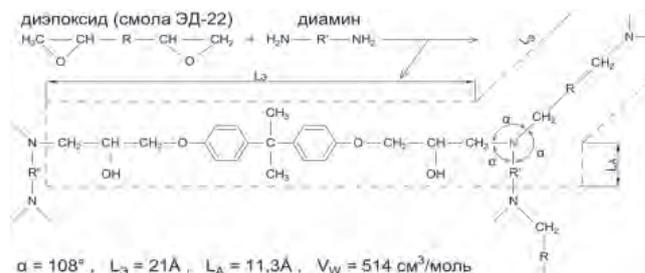


Рис. 1. Схема образования трифункционального узла молекулярной сетки эпоксиаминного полимера

Fig. 1. Schematic pattern of the formation of a trifunctional unit of the epoxy-amine polymer molecular network

эфирных, фурановых. А это открывает широкие возможности для физико-химической модификации эпоксидных полимеров и применения в самых различных отраслях технической деятельности человека, от ювелирных изделий до корпусов ракет, например ракеты «Тополь», подводных лодок, а также конструкций из полимербетона. Хотя эпоксидные смолы не относятся к продуктам крупнотоннажной химии, однако по разнообразию способов технического применения им нет равных среди других полимеров. И главный фактор – высокая адгезия, которая обеспечивает им широкое применение в конструкционных клеях, защитных и декоративных покрытиях и, конечно, в композиционных материалах, отличающихся наивысшими показателями удельной прочности, жесткости и долговечности.

Водные дисперсии эпоксидных смол эффективно применяются в аппретах для стеклянных, базальтовых и углеродных волокон в конструкционных композитах, в цементополимерных бетонах, в ремонтных строительных композитах.

В статье рассмотрено два варианта совместной работы, а именно деформировании при механическом нагружении до разрушения, двух адгезионно связанных конструкционных материалов: цементного бетона и эпоксидного композита в типичной строительной конструкции – балке, работающей на изгиб под нагрузкой.

В первом случае одноосно ориентированный эпоксидный стеклопластик в виде круглых стержней – арматуры устанавливается в стальной форме с последующей укладкой в нее бетонной смеси (водная высококонцентрированная тиксотропная дисперсная система), которая затем твердеет по заданному режиму, после чего готовая балка расформовывается для последующего применения (в нашем случае – испытания нагружением). Следует подчеркнуть, что адгезионный контакт бетона образуется при твердении цементного вяжущего на твердой поверхности эпоксидного полимера. Бетон – жесткий, хрупкий искусственный камень с низкой прочностью при растяжении (в 10–30 раз меньшей, чем при сжатии) и удлинением при разрыве 0,03%.

Во втором варианте на поверхность готовой типовой железобетонной балки (бетон армирован стальной арматурой) наносилась эпоксиаминная жидкая

композиция, содержащая рубленое базальтовое волокно (длина 10–12 мм, диаметр 13 мкм), которое, хаотически распределенное, обеспечивало тиксотропные свойства (нестекание с вертикальной поверхности), а после отверждения связующего – упрочнение твердого покрытия. В этом варианте адгезионный контакт с бетоном образуется при отверждении эпоксидного покрытия на твердой поверхности бетонной балки, т. е. этот вариант, обратный первому.

Начнем с полимеркомпозитной арматуры (ПКА) и ее совместной работы с цементным бетоном в конструкции. В последние десять–двенадцать лет на строительном рынке все большее внимание привлекает этот высокопрочный одноосноармированный композиционный материал, изготовленный из базальтовых, стеклянных, арамидных (полимерных) или углеродных волокон и полимерных связующих на основе эпоксидных смол. Арматурные стержни производятся методом пултрузии – протяжки ровинга, пропитанного жидким связующим, через фильеру круглого сечения с одновременной обмоткой сформованного стержня с натягом по спирали тонким жгутом или покрытием кварцевым песком. Образуется так называемый круглый опесчаненный профиль наподобие наждака. Второй метод – нидлтрузия – бесфильерный, при котором формирование круглого стержня из собранных в пучок пропитанных прядей ровинга осуществляется винтовой обмоткой одной-двумя такими же прядями при непрерывной протяжке стержня с заданной скоростью. Высокая производительность технологических линий, малая металло- и энергоемкость оборудования, небольшие производственные площади обеспечили быстрое распространение в России малых предприятий по выпуску ПКА и насыщение ею рынка строительных материалов. Однако замена металла на ПКА в настоящее время неосуществима и необоснованна по ряду причин.

Основные свойства полимеркомпозитной арматуры (ПКА):

- высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах;
- временное сопротивление при растяжении R до 1600 МПа (у стали А400 – 590 МПа);
- высокое электрическое сопротивление (диэлектрик) и радиопрозрачность;
- низкая объемная плотность $\sim 1900 \text{ кг/м}^3$ (у стали 7850 кг/м^3);
- низкая теплопроводность – 0,45 Вт/(м·К): сталь – 58 Вт/(м·К); бетон – 1,7 Вт/(м·К);
- низкий модуль упругости: $E=40000\text{--}50000$ МПа (у стали А400 – 200000 МПа);
- низкая теплостойкость ПКА (120–140°С);
- невозможность изготовления гнутых стержней, сварки в построечных условиях.

Внешний вид некоторых промышленных образцов ПКА и структура этого композиционного материала представлены на рис. 2.

Модуль упругости ПКА в 4–5 раз меньше, чем у стальной арматуры, а это значит, что армированные

ею бетонные балки и другие изгибаемые конструкции будут иметь прогиб при равновеликой нормативной нагрузке соответственно больший, который окажется выше предельно допустимого, что приведет к разрушению бетона в растянутой зоне при сохранении целостности ПКА (ее прочность в 3–4 раза больше, чем у стальной). Таким образом, повышенная деформативность ПКА, выраженная низким (по сравнению со сталью) модулем упругости является главным препятствием для ее применения в изгибаемых бетонных конструкциях, для которых арматура и предназначена. Причина структурная (рис. 2, с): жесткие волокна – базальтовые, стеклянные, углеродные разделены и объединены прослойками относительно податливого эпоксидного связующего. При приложении механической нагрузки оно деформируется больше, чем волокно, с которым оно адгезионно связано [8] (рис. 3).

По этой причине эпюра нормальных напряжений в сечении ПКА при растяжении нелинейна (рис. 4) ввиду передачи растягивающих напряжений от наружных слоев (волокон) к внутренним через податливые прослойки полимерной матрицы, модуль упругости которой многократно ниже, чем у волокон (это установил еще Фролов в 1980 г.). Поэтому разрушение стержня ПКА начинается с разрыва наиболее напряженных волокон, расположенных по периметру его сечения, а далее последовательно распространяется на внутренние слои. Проявлением этого структурно-механического эффекта является сильная зависимость прочности при растяжении ПКА от диаметра: с его уменьшением она растет. Например, предел прочности при растяжении стеклопластиковой арматуры с опесчаненным профилем возрастает с изменением диаметра следующим образом: диаметр 10 мм – 889 МПа; 8 мм – 1170 МПа; 6 мм – 1268 МПа.

Известно, что целостность, несущая способность и надежность армированной бетонной конструкции определяются прочным сцеплением цементного бетона с поверхностью арматурного стержня на весь период эксплуатации. Именно это является критерием совместной работы двух материалов в конструкции: сплошного бетонного камня и пронизывающего его арматурного каркаса из высокопрочных стержней.

Исследование сцепления ПКА с бетоном выполнялось методом прямого вырыва в соответствии с методикой ГОСТ 31938–2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» на разрывной машине Р-5 со скоростью перемещения активной траверсы 10 мм/мин. Величина деформаций проскальзывания (выдергивания из бетонного образца) определялась часовым индикатором с точностью 0,01 мм, установленным на ненагруженном конце стержня. Длина сопряжения образцов ПКА с бетоном составляла 50 мм, что позволяло определить касательные напряжения при вырыве, близкие к средним. [9] Для исследований использовались промышленные образцы стеклопластиковой арматуры с номинальным диаметром 8 мм на основе эпоксидного связующего – смолы типа



Рис. 2. Образцы ПКА, представленные на рынке РФ: а – с вдавленным профилем; б – песчаный профиль; с – микрофотография фрагмента поперечного сечения ПКА (×300)

Fig. 2. PCR samples available of the Russian market: a – with a depressed profile; b – sandy profile; c – microphotography of a fragment of the PCR cross section (×300)

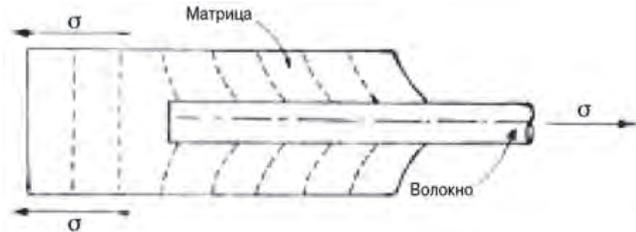


Рис. 3. Картина распределения деформаций в полимерной матрице, окружающей волокно, к которому прилагается растягивающее усилие [8]

Fig. 3. Pattern of the strain distribution in a polymer matrix surrounding the fiber, to which a tensile force is applied [8]

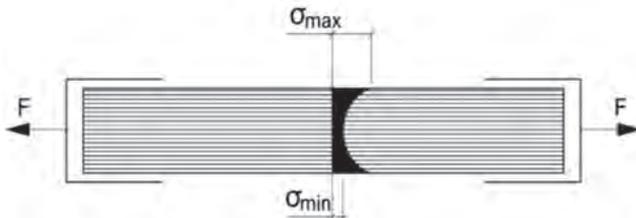


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по сечению ПКА при растяжении

Fig. 4. Distribution of normal stresses over the PCR section in tension

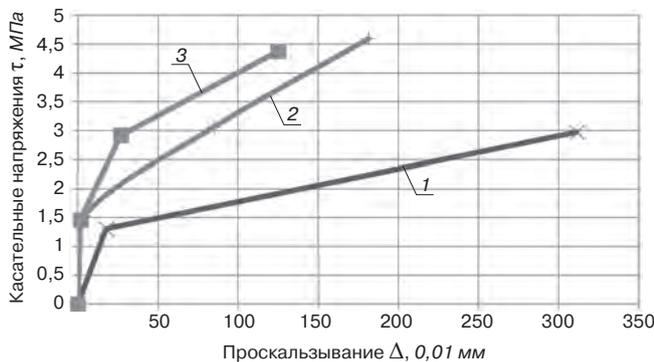
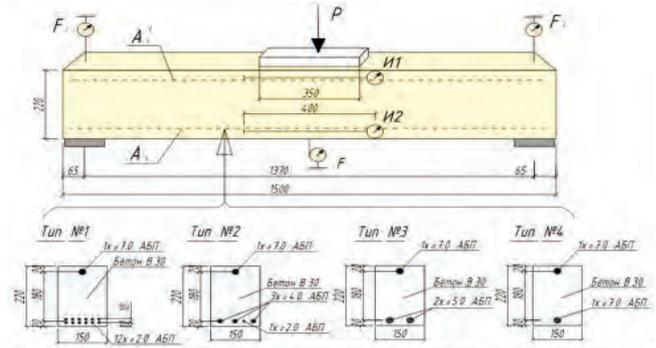


Рис. 5. Зависимость «τ–Δ» при испытании на вырыв гладких стержней: 1 – стальная арматура (гладкая); 2 – стальная арматура (гладкая) + эпоксидное покрытие; 3 – ПКА (гладкая) + эпоксидное покрытие

Fig. 5. Dependence of «τ–Δ» during the tests for pull-out of smooth rods: 1 – steel reinforcement (smooth); 2 – steel reinforcement (smooth) + epoxy coating; 3 – polymer composite reinforcement (smooth) + epoxy coating

ЭД-20, отверждаемой изометилтетрагидрофтальевым ангидритом (изо-МТГФА) по технологии пултрузии. Диаметр стекловолокна 24–27 мкм, их число в ровинге – 4000, количество ровингов в ПКА диаметром 8 мм – 15 шт.

Сравнительные испытания прочности сцепления цементного бетона с гладкой поверхностью отвер-

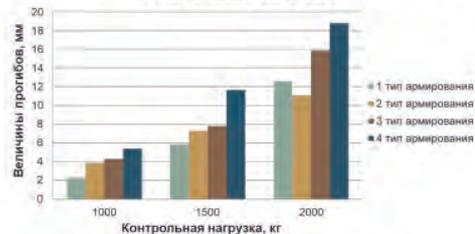


№	Диаметр арматуры, мм	Кол-во стержней	Суммарная площадь сечения арматуры, мм ² (A)	Удельная поверхность сцепления (с = π · d · 10 мм), мм ²	Коэффициент α = $\frac{c}{A} \cdot 10$
1	2	12	37,7	75,39	20
2	4 + 2 (доп.)	4	37,73	43,98	11,7
3	5	2	39,27	31,42	8
4	7	1	38,48	21,99	5,7

Рис. 6. Испытание балок из бетона класса В30, армированных ПКА

Fig. 6. Tests of beams made of class B30 concrete reinforced with PCR

Гистограмма изменения прогибов в балках разного типа армирования при контрольных нагрузках



№ п/п	Тип армирования	при f = 1/300 = 4,57 мм		при f = 1/150 = 9,13 мм	
		Нагрузка, кг	Напряжения в арматуре, МПа	Нагрузка, кг	Напряжения в арматуре, МПа
1	12x2мм	1375	588	1650	707,5
2	3x4мм+ 1x2мм	1300	555	1720	737
3	2x5мм	1220	500	1550	635
4	1x7мм	930	388	1350	565

Рис. 7. Результаты испытаний балок, армированных ПКА разных диаметров

Fig. 7. Test results of beams reinforced with PCRs of different diameters

жденного эпоксидного полимера и с гладким стальным стержнем показали, что в первом случае оно выше, чем во втором. Результат оказался неожиданным, свидетельствующим в пользу ПКА на эпоксидном связующем (на других она не производится), хотя и стальная и ПК-арматура применяется только профилированная для полной реализации ее прочности.

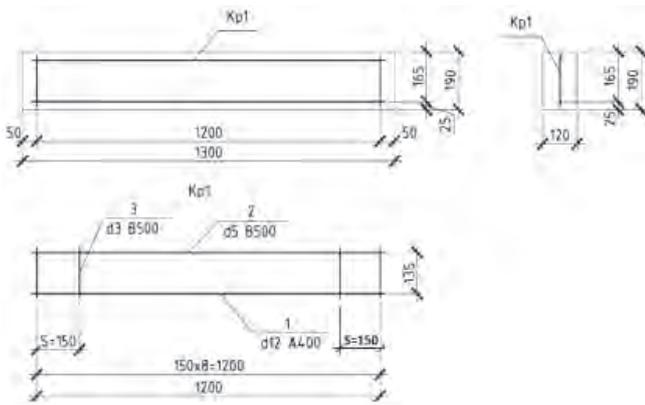


Рис. 8. Армирование железобетонных балок
Fig. 8. Reinforcement of reinforced-concrete beams



Рис. 9. Расчетные схемы испытаний железобетонных балок
Fig. 9. Design schemes for testing reinforced concrete beams

Адгезия предопределяет совместное деформирование у границы контакта двух разных по прочности и модулю упругости материалов, при этом более жесткий будет сдерживать деформирование более податливого. Исходя из этого, взаимное влияние бетона и ПКА в конструкции будет зависеть от размера удельной поверхности их раздела в объеме бетона. А она определяется диаметром арматуры – чем он меньше, тем больше суммарная поверхность раздела с бетоном конструкции.

Поэтому 1-й этап исследований был посвящен испытанию бетонных балок, армированных разными вариантами размещения ПКА в сечении конструкции. Балки сечением 150×220 мм, длиной 1,5 м были изготовлены из бетона В30. Армирование производилось опесчаненными стержнями ПКА диаметром 7; 5; 4; 2 мм с обеспечением постоянной суммарной площади сечения $A_s = n \cdot \pi \cdot d^2 / 4$, что достигалось изменением числа стержней в сечении. При этом площадь поверхности контакта ПКА с бетоном $s = n \cdot \pi \cdot d \cdot l$ была переменной. Схема испытания и типы армирования балок приведены на рис. 6.

Учитывая большую зависимость прочности ПКА от диаметра (при неизменном модуле упругости), можно рассчитывать на более полное использование прочности стержней малых диаметров, имеющих к тому же большую суммарную поверхность стержней при равной площади поперечного сечения. А это увеличивает объем адгезионно связанного бетона, вовлеченного в совместную работу с арматурой и сдерживающего ее деформацию.

На рис. 6 представлены количественные параметры армирования бетонных балок с разными вариан-

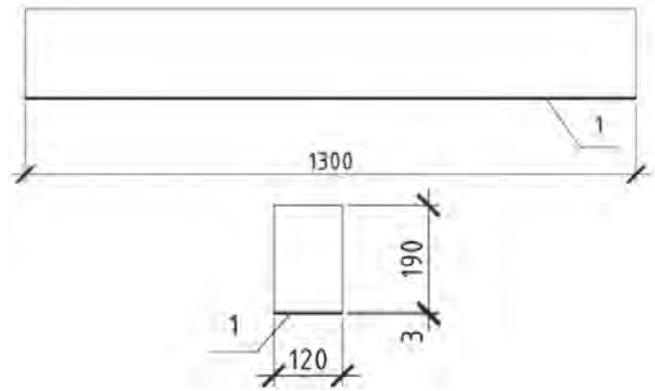


Рис. 10. Схема нанесения эпоксидного дисперсно-волокнутого покрытия на поверхность железобетонных балок B2, B3, B4 (1 – горизонтальная полоса – эпоксидное покрытие толщиной 3 мм)

Fig. 10. Scheme of applying an epoxy dispersed fibrous coating on the surface of reinforced concrete beams B2, B3, B4 (1 – horizontal strip – a 3 mm thick epoxy coating)

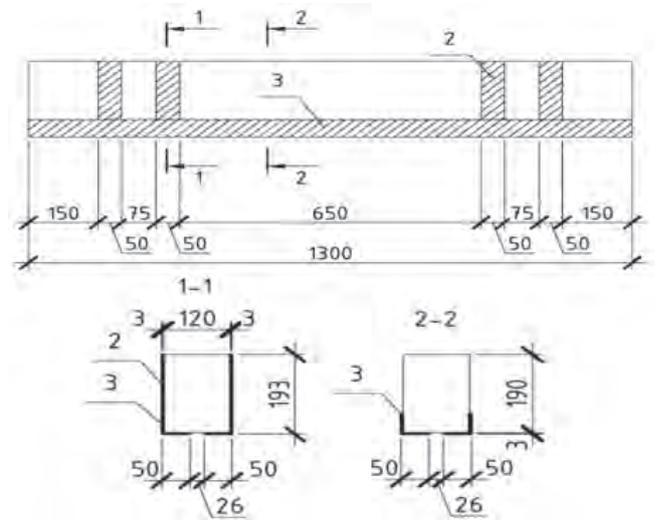


Рис. 11. Схема нанесения эпоксидного дисперсно-волокнутого покрытия толщиной 3 мм на поверхность железобетонной балки B6 (2 – вертикальная полоса эпоксидного покрытия; 3 – угловая полоса эпоксидного покрытия)

Fig. 11. Scheme of applying a 3-mm thick epoxy dispersed fibrous coating on the surface of reinforced concrete beam B6 (2 – vertical stripe of epoxy coating; 3 – corner strip of epoxy coating)

тами размещения в их сечении стержней ПКА разных диаметров при соблюдении равной суммарной площади их поперечного сечения A . Показано, что удельная поверхность сцепления с бетоном S наибольшая при армировании двенадцатью стержнями ПКА диаметром 2 мм, как и безразмерный коэффициент α , равный отношению удельной поверхности стержней к суммарной площади их поперечного сечения.

Деформативность балок оценивалась по значениям прогибов, достигаемых при контрольных нагрузках 1000, 1500 и 2000 кг. Как следует из гистограмм (рис. 7), при контрольной нагрузке 1000 кг прогибы балок 1-го типа армирования (12×2 мм) находились в интервале 1,82–2,65 мм; у балок 2-го типа выше в среднем на 70%; у балок 3-го типа выше на 89%, а у балок четвертого типа выше на 138%. Аналогичная тенденция, хоть и в меньшем выражении, прослеживается и при нагрузках 1500, 2000 кг.

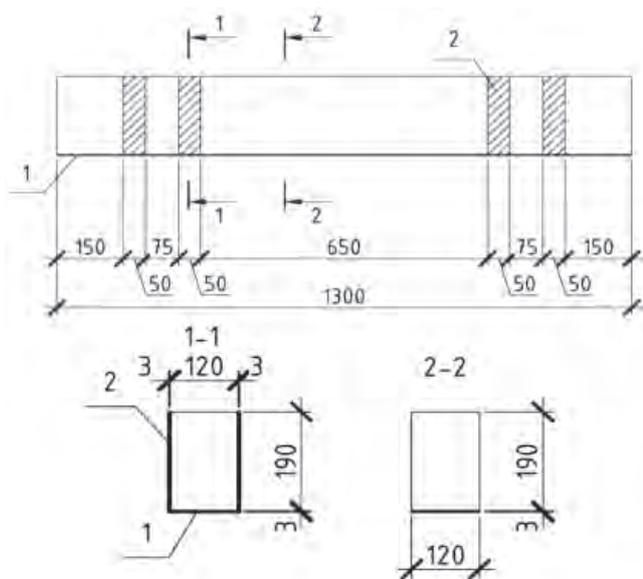


Рис. 12. Схема нанесения эпоксидного дисперсно-волокнутого покрытия на поверхность железобетонной балки Б7 (1 – горизонтальная полоса эпоксидного покрытия; 2 – вертикальная полоса эпоксидного покрытия)

Fig. 12. Scheme of applying a 3-mm thick epoxy dispersed fibrous coating on the surface of reinforced concrete beam B7 (1 – horizontal strip of epoxy coating; 2 – vertical stripe of epoxy coating)

Наибольшие нагрузки при контрольных прогибах 1/300 и 1/150 пролета воспринимаются балками с армированием 1-го и 2-го типов (табл. на рис. 7). При этом выдерживаемая нагрузка у балок 1-го типа на 47% больше, чем у балок 4-го типа при прогибе 1/300 пролета и на 22% больше при прогибе 1/150. Таким образом, при увеличении удельной поверхности сцепления ПКА с бетоном в растянутой зоне балок их жесткость существенно возрастает.

Механизм эффекта малых диаметров ПКА в бетонных балках заключается как в полном включении в работу стержней малых диаметров, имеющих большую прочность, так и в вовлечении в процесс их деформирования адгезионно связанных прилегающих слоев бетонной матрицы. Аналогом второго фактора – вовлечения матрицы в процесс деформирования – является известная в полимерных композитах картина взаимодействия волокна с полимерной матрицей [8] (рис. 3). Однако в рассматриваемом случае матрица жесткая бетонная, а не податливая полимерная и потому она сдерживает деформирование ПКА (эффект деформационного стеснения), повышая изгибную жесткость бетонной конструкции. Установлено также, что характер разрушения балок при нагружении зависит от варианта распределения арматуры в сечении (рис. 6): в первом случае (12×2 мм) $\alpha=20$, балка разрушается классически, как со стальной арматурой, – по нормальному сечению с разрывом рабочей арматуры; в остальных вариантах происходит разрушение бетона по наклонным сечениям без разрыва ПКА.

А теперь обратимся ко второму варианту совместной работы эпоксидного полимера с бетоном также в балочной конструкции. Речь пойдет об усиливающем эффекте эпоксидных покрытий. Эпоксидные покры-

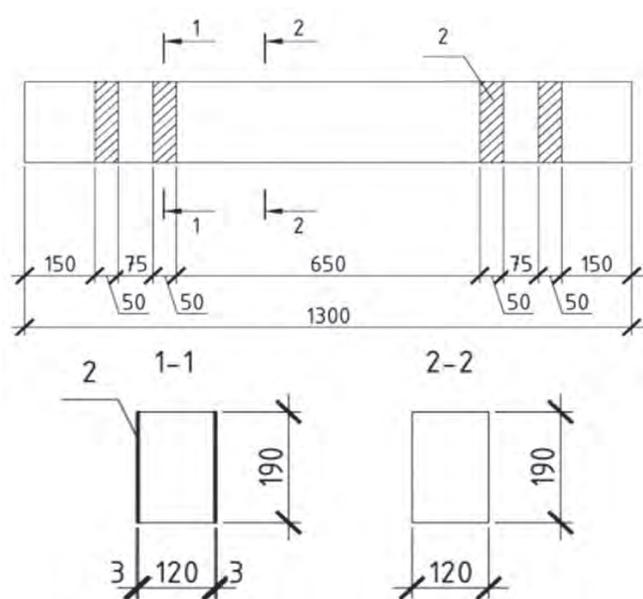


Рис. 13. Схема нанесения эпоксидного дисперсно-волокнутого покрытия толщиной 3 мм на поверхность железобетонной балки Б8 (1 – горизонтальная полоса эпоксидного покрытия; 2 – вертикальная полоса эпоксидного покрытия)

Fig. 13. Scheme of applying a 3-mm thick epoxy dispersed fibrous coating on the surface of reinforced concrete beam B8 (1 – horizontal strip of epoxy coating; 3 – vertical stripe of epoxy coating)

тия для защиты от коррозии железобетонных конструкций хорошо известны, их технологические преимущества нанесения вязкотекучих композиций лакокрасочными методами в сочетании с высокой стойкостью к большинству химически агрессивных сред с лихвой перекрывают высокую стоимость эпоксидных смол. Низкая приведенная стоимость, обусловленная длительным сроком эксплуатации, обеспечивает эпоксидным покрытиям (впрочем, как и большинству материалов на их основе) гарантированный экономический эффект. Однако, при их применении для защиты бетона в конструкциях не учитывается их «силовой» потенциал, заключающийся в значительно большей, чем у бетона (на порядок), прочности при растяжении и деформативности, а главное, в совместной работе под нагрузкой, точнее, совместном деформировании в зоне адгезионного контакта бетон–полимер. Его разрушение всегда носит когезионный отрыв по бетону, какого бы высокого класса по прочности он ни был. Поэтому эпоксидные покрытия априори должны усиливать железобетонные конструкции и прежде всего увеличивать трещиностойкость бетона в растянутой зоне изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций.

Для подтверждения тезиса об усиливающей функции эпоксидного покрытия, а именно роста трещиностойкости (увеличения нагрузки трещинообразования и ограничения ширины раскрытия трещин в бетоне ЖБ конструкций), авторами была разработана эпоксидная композиция холодного отверждения (на основе смолы ЭД-20 и аминного отвердителя), содержащая для обеспечения тиксотропии – нестекания с вертикальных и потолочных поверхностей – короткое рубленое базальтовое волокно и тонкодисперсный напол-



Рис. 14. Схема испытания балки Б1
Fig. 14. Scheme for testing of beam B1

нитель. На поверхность железобетонных конструкций дисперсно-волоконная вязкотекучая композиция наносится ручным способом или механизированным набрызгом толщиной до 3 мм массой 3,3–3,5 кг/м².

Свойства отвержденного покрытия следующие:

- прочность при растяжении – 80 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 2700 МПа;
- водопоглощение (24 ч) – 1 мас. %;
- адгезионная прочность с бетоном В25 (когезионный отрыв по бетону) – 8 МПа;
- прогиб бетонного образца 160×160×40 мм с покрытием нижней поверхности до появления трещин – 3 мм.

Для экспериментальной проверки и оценки эффекта усиления железобетонных изгибаемых конструкций дисперсно-волоконным эпоксидным покрытием были изготовлены и испытаны балки прямоугольного сечения (рис. 8). Всего изготовлено и испытано восемь балок, разделенных на четыре серии. В пределах серий образцы отличались расчетной схемой испытания и схемами нанесения эпоксидного базальтоволоконного покрытия (рис. 9–13).

Схемы нанесения эпоксидного дисперсно-волоконного покрытия выбирались с таким расчетом, чтобы можно было изучить его влияние на образование и раскрытие трещин в железобетонном элементе при различных напряженных состояниях при изгибе, как в зоне действия нормальных напряжений, так и в зоне совместного действия нормальных и касательных напряжений. Балки были изготовлены из тяжелого бетона класса В20.

Общий вид испытательного стенда показан на рис. 14, картина развития трещин на рис. 15.

В процессе испытаний измеряли прогибы, ширину раскрытия и высоту (длину) трещин. Нагружение балок производилось ступенями по 0,1 от ожидаемой разрушающей нагрузки. На ступенях во время выдержки нагрузки фиксировались прогибы и характер развития, высота и ширина раскрытия трещин. За предельное состояние принималось физическое разрушение балок, характеризующееся дроблением бетона сжатой зоны или нарушением сцепления продольной арматуры с бетоном растянутой зоны.



Рис. 15. Картина развития трещин в балке Б1
Fig. 15. Pattern of crack development in beam B1

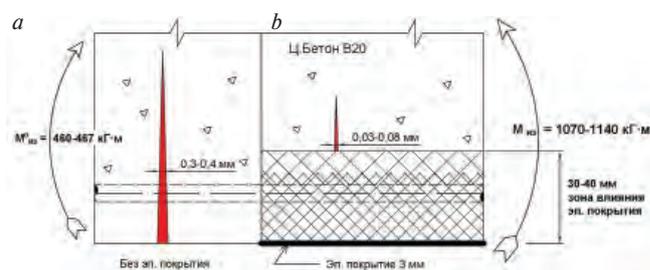


Рис. 16. Схема образования трещин в ЖБ-балках: а – без покрытия; б – эпоксидное покрытие 3 мм

Fig. 16. Pattern of crack development in the RC beams: а – without coating; б – epoxy coating 3 mm

В железобетонных балках без эпоксидного покрытия по мере роста величины нагрузки постепенно происходит образование, раскрытие и рост трещин по высоте балок. При этом трещины образовывались в растянутой грани балок и постепенно развивались по высоте балки и раскрывались. Высота трещин была больше половины высоты сечения балки (10–12 см). Ширина раскрытия трещин на уровне центра тяжести продольной растянутой арматуры составляла 0,3–0,4 мм и постепенно уменьшалась по высоте. При этом изгибающий момент трещинообразования бетона растянутой зоны равнялся $M_{cr}=460-467$ кг·м (рис. 16, а).

В железобетонных балках с эпоксидным базальтоволоконным покрытием бетона растянутой зоны образование и развитие трещин в нем существенно отличались от балок-близнецов без покрытия (рис. 16, б). В этих балках в растянутой грани трещины не образовывались. Их появление обнаруживалось на боковой поверхности балки лишь на расстоянии 3–4 см от нижней грани. Это показывает, что зона влияния эпоксидного покрытия в бетоне класса В20 за счет высокой адгезии распространяется на расстоянии 10–13 толщин покрытия. При этом установлено, что сцепление между растянутым бетоном и покрытием сохраняется на всех этапах нагружения до достижения предельного состояния (разрушения бетона). При этом ширина раскрытия трещин составляла 0,03–0,08 мм.

Результаты экспериментальных исследований показывают (см. таблицу), что изгибающий момент об-

Результаты испытаний ЖБ-балок на изгиб
Bending test results for RC-beams

Балки без покрытия (контрольные)	Балки с покрытием (все варианты)
Изгибающий момент трещинообразования	
$M_{cr} = 0,46 - 0,4675$ тс·м	$M_{cr} = 1,07 - 1,14$ тс·м (в 2,3–2,4 раза больше)
Максимальная ширина раскрытия трещин	
$A_{cr} = 0,3 - 0,4$ мм (на уровне ц.т. продольной арматуры)	$A_{cr} = 0,03 - 0,08$ мм (в 5–10 раз меньше) (на уровне 10–13 толщин эпоксидного покрытия – 3–4 см)
Высота трещин	
10–12 см	3–5 см

разования нормальных трещин в растянутой зоне бетона балок с эпоксидным дисперсно-волокнуемым покрытием, независимо от схемы нагружения и схемы устройства покрытия, в два и более раза больше. Конкретно в балках с покрытием момент образования трещин M_{cr} находится в пределах 1,07–1,14 тс·м (в балках без покрытия $M_{cr} = 0,46 - 0,4675$ тс·м), т. е. в 2,33–2,44 раза больше, чем в балках без покрытия. Таким образом, устройство эпоксидного дисперсно-волокнуемого покрытия в бетоне растянутой зоны железобетонных балок увеличивает момент образования трещин M_{cr} более чем в два раза, а ширину раскрытия нормальных трещин уменьшает до 5–10 раз.

Эпоксидное дисперсно-волокнуемое покрытие, вследствие прочного адгезионного сцепления с бетоном, и при работе под нагрузкой вовлекает в совместное деформирование слой бетона толщиной 3–4 см без его трещинообразования. Изменяется напряженно-деформированное состояние сечения ЖБ-балки: трещины образуются на значительном расстоянии от нижней грани сечения при более высоких значениях нагрузки и имеют незначительное раскрытие $a = 0,03 - 0,08$ мм $\ll a = 0,3$ мм на всех стадиях нагружения, включая и стадию предельного состояния.

Таким образом, эпоксидные покрытия железобетонных конструкций могут не только защищать их от коррозии, но и выполнять функции усиления, особенно в изгибаемых элементах, что целесообразно учитывать при их расчете для объектов с агрессивными условиями эксплуатации (химической промышленности и др.)

Заключение

Два конструктивных материала, сильно отличающихся по химической природе, физической структуре и деформационно-прочностным свойствам: эпоксидный полимер – органический аморфный (податливый) и неорганический поликристаллический цементный бетон (твердый, хрупкий) при условии прочного адгезионного контакта могут взаимно влиять на деформационные свойства: бетон – увеличивать жесткость эпоксидного полимера, а эпоксидный полимер – деформативность бетона. Каждый из этих эффектов взаимного усиления может существенно увеличить несущую способность и трещиностойкость изгибаемых бетонных конструкций.

Список литературы

1. Бикерман Я.О. Новые представления о прочности адгезионных связей полимеров // *Успехи химии*. 1972. Т. 16. № 8. С. 1431–1465. <https://doi.org/10.1070/RC1972v041n08ABEN002083>
2. Щербина А.А., Чалых А.Е. Адгезия и аутогезия полимеров. Переходные зоны. Фазовые равновесия. Взаимо- и самодиффузия. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2018. 352 с.
3. Кардашов Д.А. Эпоксидные клеи. М.: Химия. 1973. 192 с.
4. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 416 с.
5. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: Учебное пособие. 4-е изд., испр. и доп. / Под ред. А.А. Берлина. СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. 592 с.
6. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров, Казань: ПИК «Дом печати», 2004. 446 с.
7. Розенберг Б.А., Олейник Э.Ф. Образование, структура и свойства эпоксидных матриц для высокопрочных композитов // *Успехи химии*. 1984. Вып. 53 (2). С. 273–289. <https://doi.org/10.1070/RC1984v053n02ABEN003037>
8. Каллистер У., Ретвич Д. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры) / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 896 с.
9. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 30–38.

References

1. Bikerman Ya.O. New ideas concerning the strength of adhesive joints of polymers. *Russian Chemical Reviews*. 1972. Vol. 16. No. 8, pp. 1431–1464. <https://doi.org/10.1070/RC1972v041n08ABEN002083>
2. Scherbina A.A., Chalykh A.E. Adheziya i autoheziya polimerov. Perekhodnye zony. Vzaimo- i samodiffuziya [Adhesion and autoadhesion of polymers. Transition zones. Mutual and self-diffusion]. Moscow: ООО "Sam Poligrafist". 2018. 352 p.
3. Kardashov D.A. Epoksidnye klei [Epoxy adhesives]. Moscow: Khimiya. 1973. 192 p.
4. Lee H., Neville K. Spravochnoye rukovodstvo po epoksidnym smolam [Reference guide to epoxy resins]. Moscow: Energiya. 1973. 416 p.
5. Polimernie kompozitnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: uchebnoye posobie [Polymer composite materials: structure, properties, technology: workbook]. Ed. by Berlin A.A. Saint Petersburg: Profesiya. 2014. 592 p.
6. Khozin V.G. Usilenie epoksidnykh polimerov [Reinforcement of epoxy polymers]. Kazan: PIK "Dom pechati". 2004. 446 p.
7. Rozenberg B.A., Oleinik E.F., The formation, structure, and properties of epoxide matrices for high-strength composites. *Russian Chemical Reviews*. 1984. Iss. 53 (2), pp. 273–289. <https://doi.org/10.1070/RC1984v053n02ABEN003037>
8. Callister W., Retwch D. [Materials Science: From Technology to Application (Metals, Ceramics, Polymers)]. Transl. from English I. Malkin. Saint Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii. 2011. 896 p.
9. Khozin V.G., Gisdatullin A.R. Compatibility of polymer-composite reinforcement with cement concrete in structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 30–38. (In Russian).

О.В. ФОТИН, зам. руководителя по научно-техническим вопросам (fotin_ov@mail.ru)

Сибирское отделение ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»
(664025, г. Иркутск, ул. Степана Разина, 27, оф. 406)

Строительство из сборного железобетона

Обоснованы предпосылки перехода на возведение зданий из сборного железобетона в современных условиях. Известно, что в 2021 г. объемы жилищного строительства достигли рекордных значений за всю историю Российской Федерации. В «Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.» отмечена необходимость сокращения продолжительности инвестиционно-строительного цикла не менее, чем на 30% за счет в том числе типового проектирования и внедрения в массовом порядке строительства из сборного железобетона. Отмечено, что возведение зданий из сборного железобетона по сравнению с монолитным строительством позволяет снизить стоимость строительства минимум на 20%; сократить сроки строительства более чем в два раза; снизить расход арматуры минимум на 20%; снизить расход бетона минимум на 30%.

Ключевые слова: развитие строительной отрасли, строительство зданий и сооружений, сборный железобетон, типовое проектирование, снижение стоимости строительства.

Для цитирования: Фотин О.В. Строительство из сборного железобетона // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 32–34.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-32-34>

O.V. FOTIN, Deputy Head for Scientific and Technical Issues (fotin_ov@mail.ru)

Siberian Branch of the Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction
(27, Off. 406, Stepana Razina Street, Irkutsk, 664025, Russian Federation)

Construction of Precast Reinforced Concrete

The prerequisites for the transition to the construction of buildings from prefabricated reinforced concrete in modern conditions are substantiated. It is known that in 2021, the volume of housing construction reached record values in the entire history of the Russian Federation. The "Strategy for the development of the construction industry and housing and communal services of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2035" notes the need to reduce the duration of the investment and construction cycle by at least 30% due, among other things, to typical design and mass implementation of precast concrete construction. It is noted that the construction of buildings from prefabricated reinforced concrete, compared with monolithic construction, makes it possible to reduce the cost of construction by at least 20%; reduce construction time by more than 2 times; reduce reinforcement consumption by at least 20%; reduce concrete consumption by at least 30%.

Keywords: development of the construction industry, construction of buildings and structures, precast concrete, typical design, reduction of construction costs.

For citation: Fotin O.V. Construction of precast reinforced concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 32–34. (In Russian).
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-32-34>

Жилье входит в число базовых потребностей человека, поэтому во всех развитых странах одна из важнейших задач государства — обеспечение граждан качественным и доступным жильем.

Исторически строительство является одной из самых значимых отраслей экономики нашей страны, определяет динамику ее развития, обеспечивает занятость, доходы миллионов граждан, а также вносит непосредственный вклад в создание комфортных и удобных условий жизнедеятельности граждан. В переходный период истории страны (1990-е гг.) из-за резкого снижения государственного финансирования упали темпы возведения крупных объектов капитального строительства. Возрождение масштабного строительства началось в конце 2000 — начале 2010-х гг. Правовой основой для этого стало принятие в конце 2004 г. Градостроительного кодекса Российской Федерации, Жилищного кодекса Российской Федерации и целого ряда значимых для строительной отрасли законов.

В 2021 г. объемы жилищного строительства достигли рекордных значений за всю историю России —

92,6 млн м², из них многоквартирные дома — 43,5 млн м², индивидуальное жилищное строительство — 49,1 млн м². Ввод жилья на одного человека в 2021 г. составил в городах 0,6 м², в сельской местности — 0,73 м². Обеспеченность населения РФ жильем по итогам 2021 г. — 27,8 м² на человека.

В советский период осуществлялось преимущественно строительство многоквартирного жилья, доля индивидуальных жилых домов в общем объеме вводимого жилья не превышала 12%. Рост объемов индивидуального жилищного строительства начался в 1990-х гг. и в 2021 г. достиг максимума — 53%.

В 2022 г. страна столкнулась с новыми вызовами, требующими мобилизации ресурсов и выработки новых подходов к решению актуальных задач в экономике и социальной сфере в условиях внешнего давления и ограничений. Развитие и поддержка строительной отрасли будут способствовать импортозамещению, созданию новых рабочих мест, увеличению спроса на продукцию промышленных производств, а результаты, которые могут быть достигнуты в этой отрасли, окажут не-



Рис. 1. Готовый жилой дом
Fig. 1. Ready-made residential building



Рис. 2. Детский сад из сборного железобетона
Fig. 2. Kindergarten made of precast reinforced concrete



Рис. 3. Строительство жилых домов
Fig. 3. Construction of residential buildings

посредственное влияние на улучшение качества жизни граждан, создание комфортной и безопасной среды, нового качества инфраструктуры для жизни, работы и отдыха человека — главного капитала нашей страны.

Распоряжением Председателя Правительства Российской Федерации № 3268-р от 31 октября 2022 г. утверждена «Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.», разработанная в комплексе с учетом важных государственных документов стратегического планирования.

Основной целью Стратегии является обеспечение достижения к 2030 г. национальных целей и стратегических задач, определенных указами Президента Российской Федерации. Задачами для достижения указанной цели являются:

- создание условий для преодоления последствий кризисных явлений за счет строительной отрасли как основы для восстановления экономики;
- повышение комфортности и доступности жилья, улучшение качества городской среды;
- формирование высокотехнологичных, конкурентоспособных отраслей строительства;
- повышение энергоэффективности строящихся и существующих объектов капитального строительства и коммунальных систем;
- вовлечение в хозяйственный оборот ранее не задействованных для строительства земельных участков;
- повышение эффективности использования земельных участков, предназначенных для строительства;
- минимизация негативного воздействия строительной отрасли на окружающую среду.

Новый ритм строительству должны придать ключевые задачи:

- сокращение продолжительности инвестиционно-строительного цикла не менее чем на 30%;
- обеспечение максимальной прозрачности его процедур за счет их цифровизации;

— привлечение необходимых для выполнения поставленных задач строительных ресурсов и повышение производительности труда.

Стратегическими целями являются: обеспечение доступности приобретения, строительства или аренды жилья не менее чем двум третям (67%) граждан страны; ввод более 1 млрд м² жилья (за период 2021–2030 гг.), в том числе многоквартирных домов не менее 550 млн м², индивидуальных жилых домов не менее 450 млн м², и формирование основы для дальнейшего развития жилищного строительства.

В «Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.» и в поручениях Президента России по итогам заседания Президиума Государственного Совета РФ от 21 июня 2022 г. одной из главных целей является сокращение продолжительности строительного цикла не менее чем на 30%.

Для достижения поставленных задач должно быть возвращено типовое проектирование и внедрение в массовом порядке сборного железобетона (рис. 1).

Согласно Стратегии увеличение доли индустриального домостроения (в том числе панельного, сборно-монолитного каркаса, сборного каркасного, блочно-модульного, деревянного и т. п.) в общем объеме строительства объектов капитального строительства должно достигнуть в 2024 г. — 35% с увеличением к 2035 г. до 75%.

Тенденция увеличения доли индустриального строительства объектов различного назначения в последние годы наблюдается во всем мире.

Известен исторический опыт, который помог России за счет перехода на строительство из сборного железобетона решить вопросы не только обеспечения населения жильем, но и резко ускорить строительство промышленных объектов. Проектные институты и строительные организации стремились максимально применять сборный железобетон. Специализированные проектные институты разрабатывали экономически обоснованные решения типовых серий. Производство и применение сборного

железобетона прочно вошло в практику работы строителей.

В современных условиях самым актуальным является увеличение строительства многоэтажных жилых зданий и объектов социально-культурного назначения: школ, детских садов, объектов торговли, культурно-развлекательных, спортивных, общественных, административных и т. д. [1, 2]. Без сборного железобетона такие задачи не решить.

Имеются два основных способа строительства многоэтажных зданий из сборного железобетона: крупнопанельные дома (КПД) и каркасные различных систем. По разным оценкам специалистов, здания из сборного железобетона (КПД или каркас) на 20–25% ниже по себестоимости в сравнении с монолитными.

Сложилось мнение, что КПД самый дешевый способ строительства многоэтажного жилья. Скорее всего, это пошло с первого этапа внедрения КПД по сравнению с кирпичными зданиями, когда сэкономили на всем. На сегодняшний день крупнопанельное строительство качественно изменилось. Разработаны новые серии домов с различными объемно-планировочными решениями, во многом удовлетворяющими запросы жильцов.

Каркасные здания более универсальные и гибкие для объемно-планировочных решений. Наружное несущее стеновое ограждение защищает каркас от внешних воздействий. Все несущие конструкции здания работают в постоянных благоприятных температурно-влажностных условиях [3–6]. Для зданий социально-культурного назначения (рис. 2, 3) каркас вообще незаменим и создает возможности для реализации любых архитектурных решений [7].

Внедрение сборного железобетона на объекте по сравнению с монолитным строительством позволит снизить стоимость строительства минимум на 20%; сократить сроки строительства более чем в два раза; снизить расход арматуры минимум на 20%; снизить расход бетона минимум на 30%.

Снижение стоимости строительства обеспечивается за счет:

- значительного сокращения трудоемкости работ на строительной площадке;
- отсутствия «мокрых» процессов по сравнению с монолитным строительством;
- снижения энергопотребления на строительной площадке на 70% в зимний период;
- изготовления с высоким качеством конструкций практически для всего здания в заводских (технологических) условиях;
- использования минимального количества технологической оснастки;
- производства строительно-монтажных работ круглосуточно и круглогодично;
- обеспечения качества поверхностей и геометрии заводского сборного железобетона по сравнению с монолитным способом возведения зданий;
- сокращения объема отделочных работ по времени и стоимости.

Список литературы

1. Николаев С.В. Возрождение крупнопанельного строительства в России // *Жилищное строительство*. 2012. № 4. С. 2–8.
2. Николаев С.В. Социальное жилье на новом этапе совершенствования // *Жилищное строительство*. 2013. № 3. С. 2–8.
3. Николаев С.В. Возрождение домостроительных комбинатов на отечественном оборудовании // *Жилищное строительство*. 2015. № 5. С. 2–5.
4. Фотин О.В. Система РКД «Иркутский каркас» многоэтажных зданий и сооружений // *Жилищное строительство*. 2015. № 5. С. 65–68.
5. Фотин О.В. Система РКД «Иркутский каркас» многоэтажных зданий и сооружений // *Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений*. 2016. № 1. С. 44–50.
6. Фотин О.В. Строительство многоэтажных зданий из сборного железобетона // *Жилищное строительство*. 2022. № 10. С. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-10-19-22>
7. Граник Ю.Г. Заводское производство элементов полносборных домов. М.: Стройиздат, 1984. 221 с.

References

1. Nikolaev S.V. Revival of large-panel construction in Russia. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 4, pp. 2–8. (In Russian).
2. Nikolaev S.V. Social housing at a new stage of improvement. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 3, pp. 2–8. (In Russian).
3. Nikolaev S.V. Revival of House Building Factories on the Basis of Domestic Equipment. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 2, pp. 4–9. (In Russian).
4. Fotin O.V. System of RKD «Irkutsk frame» of multi-storey buildings and structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 5, pp. 65–68. (In Russian).
5. Fotin O.V. The system of RCD «Irkutsk frame» of multi-storey buildings and structures. *Seismicheskoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2016. No. 1, pp. 44–50. (In Russian).
6. Fotin O.V. Construction of multi-storey buildings from precast reinforced concrete. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2022. No. 10, pp. 19–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-10-19-22>
7. Granik Yu.G. Zavodskoe proizvodstvo elementov polosbornykh domov [Factory production of elements of fully assembled houses]. Moscow: Stroyizdat. 1984. 221 p.

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41>

Л.И. КАСТОРНЫХ, канд. техн. наук (likas9@mail.ru),
 А.В. КАКЛЮГИН, канд. техн. наук (kaklugin@gmail.com),
 М.А. ГИКАЛО, магистрант (gikalo_max@mail.ru)

Донской государственной технической университет (344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162)

Влияние суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов на эффективность термообработки монолитного бетона

Исследованы особенности термообработки монолитного бетона с суперпластификаторами на основе поликарбоксилатов. При проектировании составов перекачиваемых бетонных смесей для бетононасосной технологии учитывали положения направленного структурообразования бетона и технологические факторы, оказывающие существенное влияние на формирование оптимальных структур искусственного конгломерата. В работе применяли цементы различного состава и активную минеральную добавку, являющуюся отходом промышленного производства. Суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе использовали в качестве водоредуцирующих добавок для обеспечения высокой связности и перекачиваемости смесей. Моделирование процессов ускорения твердения бетона проводили в лабораторной пропарочной камере по режимам, обеспечивающим достижение бетоном требуемой распалубочной прочности в экономически обоснованные сроки. Выявлено, что негативное воздействие высокой температуры, выражаемое в снижении прочности бетона, проявляется в большей степени для составов с высоким расходом суперпластификатора. Установлено, что для интенсификации твердения монолитного бетона с суперпластификаторами на поликарбоксилатной основе необходима оптимизация его состава и параметров термообработки. Длительность предварительного выдерживания бетона перед прогревом должна согласовываться с характером процессов структурообразования цементного камня. Для устранения негативного влияния высокой температуры на прочность бетона момент начала теплового воздействия должен совпадать с завершением индукционного (подготовительного) периода в цементном тесте. В производственных условиях монолитного бетонирования рекомендуются следующие параметры термообработки: длительность предварительного выдерживания не менее пяти часов, скорость подъема температуры не более 10°C/ч, температура изотермического обогрева не более 50°C. Оценка качества термообработки монолитного бетона следует выполнять по коэффициенту эффективности термообработки.

Ключевые слова: монолитный бетон, суперпластификатор на основе поликарбоксилатов, бетононасосная технология, термообработка монолитного бетона, эффективность термообработки бетона.

Для цитирования: Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Гикало М.А. Влияние суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов на эффективность термообработки монолитного бетона // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 35–41.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41>

L.I. KASTORNYKH, Candidate of Sciences (Engineering) (likas9@mail.ru), A.V. KAKLYUGIN, Candidate of Sciences (Engineering) (kaklugin@gmail.com), M.A. GIKALO, Master's student (gikalo_max@mail.ru)
 Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya Street, Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation)

The Effect of Polycarboxylate-Based Superplasticizers on the Efficiency of Heat Treatment of Monolithic Concrete

The features of heat treatment of monolithic concrete with superplasticizers based on polycarboxylates are investigated. When designing the compositions of pumped concrete mixtures for concrete pumping technology, the provisions of directed concrete structure formation and technological factors that have a significant impact on the formation of optimal structures of an artificial conglomerate were taken into account. In the work, cements of various compositions and an active mineral additive, which is a waste of industrial production, were used. Polycarboxylate-based superplasticizers were used as water-reducing additives to ensure high connectivity and pumpability of mixtures. Modeling of concrete hardening acceleration processes was carried out in a laboratory steaming chamber according to the regimes that ensure that concrete achieves the required stripping strength in an economically reasonable time. It was revealed that the negative effect of high temperature, expressed in a decrease in the strength of concrete, is manifested to a greater extent for compositions with a high consumption of superplasticizer. It is established that in order to intensify the hardening of monolithic concrete with polycarboxylate-based superplasticizers, it is necessary to optimize its composition and heat treatment parameters. The duration of preliminary curing of concrete before heating should be consistent with the nature of the processes of structure formation of cement stone. To eliminate the negative effect of high temperature on the strength of concrete, the moment of the beginning of the thermal effect should coincide with the end of the induction (preparatory) period in the cement paste. Under the production conditions of monolithic concreting, the following heat treatment parameters are recommended: the duration of preliminary curing is not less than five hours, the temperature rise rate is not more than 10°C/h, the temperature of isothermal heating is not more than 50°C. The evaluation of the quality of heat treatment of monolithic concrete should be carried out according to the coefficient of heat treatment efficiency.

Keywords: monolithic concrete, polycarboxylate-based superplasticizer, concrete pump technology, heat treatment of monolithic concrete, efficiency of concrete heat treatment.

For citation: Kastornykh L.I., Kaklyugin A.V., Gikalo M.A. The effect of polycarboxylate-based superplasticizers on the efficiency of heat treatment of monolithic concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 35–41. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-35-41>

Действующая в столичном регионе программа реновации жилья становится актуальной и в других городах страны. Например, в Ростове-на-Дону к ветхому и аварийному жилью уже относят многоквар-

тирные дома из объемных блоков, крупноблочные и крупнопанельные дома, а также многоквартирные дома с кирпичными несущими стенами, построенные по типовым проектам, разработанным в период

с 1957 по 1968 г. Снос зданий потребует на законодательном уровне расселения людей в равноценное (равнозначное) жилье. Поэтому строительным комплексом Ростова-на-Дону запланировано множество проектов комплексного развития, самым масштабным из которых является застройка на месте старого аэропорта. Комплексное развитие этой территории до конца 2040 г. предусматривает возведение 1,4 млн м² жилья и 700 тыс. м² коммерческой недвижимости. По объемно-пространственной организации микрорайон запланирован как один из самых высотных в Ростове-на-Дону: предельные параметры жилой застройки составят 32 этажа.

Для реализации проектов высотного строительства из монолитного бетона потребуются нестандартные технологические решения и инновационные строительные материалы. Успешно решить техническую задачу возможно за счет внедрения бетононасосного метода транспортирования и укладки высокоподвижных бетонных смесей и использования самоподъемной опалубки, оборачиваемость которой может быть увеличена за счет термообработки бетона в холодный период года.

Внедрение инновационных материалов при проектировании составов бетона для монолитного строительства требует учитывать положения формирования оптимальной структуры бетона, соответствующие принципам обеспечения повышенной плотности и оптимизации содержания компонентов структуры [1]. Помимо вышеперечисленных условий, необходимо учитывать ряд технологических факторов, оказывающих весьма существенное влияние на формирование структуры монолитного бетона. Одним из таких факторов, определяющих технико-экономическую эффективность монолитного бетонирования, является интенсификация процессов твердения, необходимая для увеличения оборачиваемости опалубки и сокращения сроков строительства. Самым эффективным способом ускорения твердения бетона является термообработка. Однако наряду с увеличением скорости набора прочности тепловое воздействие может вызывать развитие негативных процессов, приводящих к формированию крупнопористой структуры и снижающих физико-механические свойства бетона [2, 3].

Другим фактором, характерным для монолитного бетонирования, является применение бетононасосов для подачи и распределения бетонных смесей в опалубке, как самый эффективный способ механизации работ [4]. Бетононасосная технология требует использования специально подобранных составов бетонных смесей, которые одновременно должны быть высокоподвижными, иметь повышенную связность и нерасслаиваемость [5]. Получение бетонной смеси с такими свойствами возможно за счет подбора оптимального гранулометрического состава заполнителей и выбора пластифицирующей добавки для цемента конкретного вида. Подбор пластификатора должен учитывать его совместимость не только с вяжущим, но и с другими минеральными составляю-

щими смеси [6–8]. Решающую роль для обеспечения высокой связности и однородности смеси имеет наличие достаточного количества тонкодисперсных частиц. При этом компенсировать увеличение водопотребности смесей возможно за счет применения суперпластифицирующих добавок. Однако в процессе выбора наиболее эффективной добавки возникает множество факторов, влияющих на технико-экономические показатели производства бетонных смесей. Особенно актуальна эта задача для добавок нового поколения – суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов, так как они весьма чувствительны к тонкости помола и зерновому составу цемента, количеству трехвалентного алюмината, наличию щелочей и примесей [9–11].

Использование суперпластификаторов – высокоэффективных модификаторов структуры – требует научного подхода при проектировании состава бетонной смеси и назначении технологических режимов обработки монолитного бетона [12, 13]. Поэтому целью настоящей работы явилась оценка влияния суперпластификаторов на поликарбоксилатной основе на свойства бетонных смесей и эффективность термообработки бетона монолитных конструкций.

Материалы и методы

Выбор суперпластификаторов для проведения исследований был продиктован доступностью на строительном рынке Донского региона. Поэтому в исследованиях для определения вида и рациональной дозировки применяли добавки торговых марок Полипласт, Реопласт и BASF:

– Полипласт ПК – универсальный суперпластификатор на основе поликарбоксилатов для товарного и сборного бетона (для регулирования сохраняемости бетонных смесей при одновременном быстром наборе ранней прочности бетона);

– Реопласт ПКЭ 2101 – суперпластифицирующая и суперводоредуцирующая добавка на основе эфира поликарбоновых кислот для регулирования удобоукладываемости, связности и сохраняемости смесей, а также для снижения водопотребности;

– Реопласт ПКЭ 2105 – суперпластифицирующая добавка на основе полимеров поликарбоксилатных простых эфиров для регулирования удобоукладываемости смесей и быстрого набора ранней прочности бетона;

– BASF MasterGlenium ACE430 (MG ACE430) – суперпластификатор на основе эфира поликарбоксилата с эффектом быстрого набора ранней прочности бетона.

Дозировку добавок (по жидкому продукту) по рекомендациям производителей варьировали в широком диапазоне от 0,3 до 2% от массы вяжущего.

Для оценки влияния вида и минералогического состава вяжущих на свойства высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов использовали различные портландцементы, технические характеристики которых (по данным произво-

Таблица 1
Table 1Основные характеристики цемента
The main characteristics of cements

Показатель, единица измерения	Вид цемента		
	ЦЕМ I 52,5Н	ЦЕМ I 42,5Н	ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС
Завод-производитель	Подгоренский	«Пролетарий»	Верхнебаканский
Прочность при сжатии (активность), МПа	59,6	51,1	50
Нормальная плотность цементного теста, %	28,2	24,75	27,5
Начало схватывания, мин	155	120	105
Удельная поверхность, м ² /кг	412	352	401
Минеральная добавка (опока), %	–	–	10,2
Прочность при сжатии после тепловой обработки, МПа	43,8	40,4	38,5
Группа по эффективности после тепловой обработки	I	I	I

Таблица 2
Table 2Химико-минералогический состав цемента
Chemical and mineralogical composition of cements

Вид цемента	Состав, %						
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	SO ₃	MgO	R ₂ O
ЦЕМ I 52,5Н	60,9	11,9	7,1	12,1	3,01	1,07	0,84
ЦЕМ I 42,5Н	63,4	15,1	5,1	13,5	3,06	0,96	0,65
ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС	65	12	4	13	2,81	0,41	0,46

дителей) приведены в табл. 1. Химико-минералогический состав цемента представлен в табл. 2.

В качестве активной минеральной добавки для приготовления смесей использовали конденсированный микрокремнезем МК-82 по ГОСТ Р 58894–2020 «Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия» – отход производства ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»: истинная плотность 2100 кг/м³; насыпная плотность 152 кг/м³; удельная поверхность 1998 м²/кг; содержание SiO₂ – 92%. Дозировка минеральной добавки, установленная ранее выполненными исследованиями [7, 13], составляла 11% от массы цемента.

В качестве заполнителей использовали природные материалы Донского региона:

– песок кварцевый: истинная плотность 2650 кг/м³; насыпная плотность 1415 кг/м³; модуль крупности 1,82; пустотность 46,6%;

– щебень из песчаника смеси фракций 5–20 мм (для высокоподвижных смесей): истинная плотность 2660 кг/м³; насыпная плотность 1410 кг/м³; марка по дробимости 1000, пустотность 47%;

– щебень из песчаника однофракционный наибольшей крупности 10 мм (для самоуплотняющихся смесей): истинная плотность 2660 кг/м³; насыпная плотность 1380 кг/м³; марка по дробимости 1000, пустотность 48,1%.

Показатели удобоукладываемости высокоподвижных бетонных смесей определяли по осадке конуса по ГОСТ 10181–2000 «Смеси бетонные. Методы испытаний», самоуплотняющихся смесей по расплыву конуса – по ГОСТ Р 59715–2022 «Смеси бетонные самоуп-

плотняющиеся. Методы испытаний». Из смеси каждого состава формовали контрольные образцы-кубы с номинальным размером ребра 100 мм. Хранение и испытание контрольных образцов бетона выполняли по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Одна часть образцов (для определения водоредуцирующего эффекта суперпластификаторов) твердела в нормальных условиях: температура 20±2°C при относительной влажности воздуха 95–100%. Другая часть образцов (для моделирования процесса интенсификации твердения в условиях строительной площадки) подвергалась термообработке (ТО).

В наших исследованиях термообработку образцов бетона T_{ТО} проводили в лабораторной пропарочной камере по режимам, структура которых включает:

$$T_{ТО} = (T_{ПВ}) + T_{П} + T_{ИЗ} + T_{О}, \quad (1)$$

где T_{ПВ} – продолжительность предварительного выдерживания без подачи теплоносителя, ч; T_П – продолжительность подъема температуры до максимальной, ч; T_{ИЗ} – длительность изотермического обогрева при максимальной температуре, ч; T_О – длительность остывания бетона в камере, ч.

В качестве показателя эффективности термообработки бетона с суперпластификаторами на поликарбоксилатной основе использовали коэффициент K_{ТО}:

$$K_{ТО} = \frac{R_{ТО}^{28} - R_{Н}^{28}}{R_{ТО}^{28}}, \quad (2)$$

где R_{ТО}²⁸ – прочность бетона после термообработки в возрасте 28 сут, МПа; R_Н²⁸ – прочность бетона нормального твердения в возрасте 28 сут, МПа.

Состав и характеристики бетонных смесей
Composition and characteristics of concrete mixes

Состав	Вид и расход материалов, кг/м ³										Осадка конуса, см	Диаметр расплыва, см	Водовязущее отношение
	ЦЕМ I 52,5Н	ЦЕМ I 42,5Н	ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС	Полипласт ПК	Реопласт ПКЭ 2101	Реопласт ПКЭ 2105	BASF MG ACE430	Щебень	Песок	Микрокремнезем МК-82			
1P	395	-	-	1,31	-	-	-	1045	792	-	16	-	0,48
2P	397	-	-	1,25	-	-	-	1050	793	-	17,5	-	0,49
3P	340	-	-	1,2	-	-	-	1000	755	38	15,5	-	0,6
4P	344	-	-	1,57	-	-	-	1012	766	38	17,5	-	0,57
5R	-	-	458	-	6,8	-	-	1008	705	-	21,5	-	0,46
6R	-	430	-	-	3,3	-	-	1030	669	-	22	-	0,58
7R	-	-	464	-	-	7	-	1028	720	-	22	-	0,44
8R	-	432	-	-	-	3,3	-	1043	676	-	22,5	-	0,56
9B	-	450	-	-	-	-	8,98	998	702	-	-	55	0,49
10B	-	512	-	-	-	-	10,3	975	718	-	-	58	0,44

Результаты и их обсуждение

Исследования по оценке влияния суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов на эффективность термообработки монолитных бетонов, приготовленных с вяжущими различного вида, проводили в три этапа. На первом этапе готовили равноподвижные бетонные смеси марки по подвижности П4 (ОК=16–20 см) с суперпластификатором Полипласт ПК. На втором этапе – бетонные смеси марки П5 (ОК=21–25 см) с суперпластификаторами Реопласт ПКЭ 2101 и ПКЭ 2105. На третьем этапе – самоуплотняющиеся смеси марки РК1 ($D_p=55–65$ см) с суперпластификатором BASF MG ACE430.

Состав и характеристики бетонных смесей приведены в табл. 3.

Проектирование составов бетонных смесей выполняли при условии, что показатели концентрации материалов, моделирующие течение упруговязкой структурированной системы, удовлетворяют требованиям перекачиваемости смесей бетононасосом [5]. Относительное водосодержание теста вяжущего находилось в пределах от 1,2 до 2,4; степень заполнения пустот в мелком заполнителе тестом вяжущего – от 1,1 до 1,9, а степень заполнения пустот в крупном заполнителе растворной частью – от 1,2 до 1,9.

В ходе исследований для смесей составов 1P–4P с добавкой Полипласт ПК установлена реологическая совместимость для системы «цемент–суперпластификатор». Бетонные смеси, приготовленные на портландцементе ЦЕМ I 52,5Н и обладающие высокой подвижностью, в процессе приготовления и укладки сохраняли однородность и нерасслаиваемость. Водоредуцирующий эффект суперпластификатора Полипласт ПК в большей степени проявлялся при увеличении его дозировки. Введение в состав

смеси тонкодисперсной минеральной добавки микрокремнезем МК-82 увеличило объем теста вяжущего, обеспечивая при этом высокую связность и перекачиваемость.

Для суперпластификаторов Реопласт ПКЭ 2101 и ПКЭ 2105 также установлена высокая водоредуцирующая эффективность при их максимальном расходе 1,5% от массы цемента (составы 5R и 7R). Бетонные смеси с этими добавками, приготовленные на сульфатостойком портландцементе с минеральной кремнеземсодержащей добавкой ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС, сохраняли стабильность и нерасслаиваемость в течение 90 мин.

Бетонные смеси составов 9B и 10B с высокой дозировкой суперпластификатора BASF MG ACE430 обладали способностью к самоуплотнению, сохраняя при этом связность и высокую однородность.

Интенсификацию твердения монолитного бетона моделировали в лабораторной пропарочной камере по режимам, выбор которых был продиктован необходимостью получения бетоном требуемой распалубочной прочности в экономически обоснованные сокращенные сроки. Режим термообработки назначали с учетом специфики теплового воздействия на структуру свежесушеного бетона с суперпластификаторами на поликарбоксилатной основе [2, 3]. Параметры термообработки и прочность бетонов с различными добавками приведены в табл. 4.

Анализ полученных результатов свидетельствует о значительном влиянии дозировки суперпластификаторов и параметров теплового воздействия на прочностные характеристики бетонов. Все исследованные суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов на начальной стадии твердения бетона оказывают замедляющее действие на процессы

Таблица 4
Table 4Параметры термообработки и прочность бетонов
Heat treatment parameters and concrete strength

Состав	Вид супер-пластификатора	Максимальная температура обогрева, °С	Режим термообработки $T_{ГО}$, ч	Предел прочности при сжатии, МПа, бетона				Коэффициент эффективности $K_{ГО}$
				нормального твердения в возрасте, сут		после ТО в возрасте, сут		
				1	28	1	28	
1P	Полипласт ПК	70	(3)+4+6+6	17,7	46,6	21,5	39,2	-0,19
2P		60	(4)+4+8+6	21,1	49	30,2	43,1	-0,14
3P		70	(4)+4+7+6	12	42,1	20,2	34,2	-0,23
4P		60	(4)+4+8+6	18,8	50	27	42,5	-0,18
5R	Реопласт ПКЭ 2101	70	(5)+4+6+4	20,9	65,3	43,3	60	-0,09
6R		50	(5)+3+7+3	10,1	42,1	20,3	43,2	+0,02
7R	Реопласт ПКЭ 2105	70	(5)+4+6+4	22	66,8	43	65,4	-0,02
8R		50	(5)+3+7+3	9,8	41,8	20	42,8	+0,02
9B	BASF MG ACE430	70	(5)+3+6+4	8,3	50,1	32,9	50,2	+0,002
10B		70	(5)+3+6+4	6,9	59,2	33,5	59,8	+0,01

гидратации вяжущего, так как, адсорбируясь на тонкодисперсных частицах цемента и минеральных компонентов смеси, создают пространственный эффект отталкивания.

Максимальный негативный эффект от температурного воздействия отмечен для бетонов составов 1P и 3P, для которых скорость подъема температуры составляла 12,5°С/ч, а температура обогрева – 70°С. Это объясняется тем, что при форсированном разогреве вода, находящаяся в химически несвязанном состоянии, перемещаясь в объеме свежеприготовленного бетона, способствует формированию крупнопористой структуры цементного камня. Резкое повышение температуры вызывает напряжения в кристаллических сростках гидратных новообразований, что провоцирует развитие термоусадочных трещин.

При увеличении длительности выдерживания бетона перед подачей теплоносителя до 5 ч, когда замедляющее действие суперпластификаторов заканчивается и успевает сформироваться более высокая начальная прочность бетона, повышение температуры до 70°С уже не оказывает существенного негативного воздействия на структуру бетона (составы 5R и 7R). Снижение скорости подъема температуры до 10°С/ч и максимальной температуры обогрева до 50°С устраняет отрицательное воздействие термообработки на прочность бетонов (составы 6R и 8R). Оптимизация параметров термообработки для бетонов этих составов, характеризующихся минимальным расходом суперпластификатора и достаточно высоким водосодержанием, обеспечила благоприятные условия для протекания физико-химических процессов и увеличения распалубочной прочности в возрасте 1 сут в два раза по сравнению с бетонами нормального твердения.

Для бетонов составов 9B и 10B, приготовленных из самоуплотняющихся смесей с суперпластификатором MG ACE430, решающим фактором для обес-

печения эффективности термообработки также является продолжительное выдерживание свежесложенного бетона перед тепловым воздействием.

В условиях реального производства эффективность термообработки монолитного бетона определяется не только достижением требуемой распалубочной прочности за короткие сроки, но и энергоемкостью процесса [14, 15]. Поэтому для варианта бетонирования монолитных конструкций из бетонных смесей с суперпластификатором на поликарбоксилатной основе выполнен расчет требуемой мощности электрооборудования в зависимости от погодных условий.

Расчет проводили на примере монолитной плиты перекрытия размерами 30×20×0,2 м. Площадь поверхности плиты 1220 м², из которой 600 м² – нижняя, 600 м² – верхняя, 20 м² – боковая. Объем укладываемого бетона – 120 м³. Модуль поверхности – 10,17.

Требуемые характеристики бетона и бетонной смеси: проектный класс по прочности при сжатии В25, требуемая прочность в возрасте 28 сут – 32,7 МПа, удобоукладываемость смеси к моменту укладки П5 (ОК=22 см), расход портландцемента ЦЕМ I 42,5Н – 400 кг/м³; дозировка добавок (по жидкому продукту): суперпластификатора Реопласт ПКЭ 2105 – 0,75% от массы цемента, противоморозной Реопласт АФ30 – 2% от массы цемента. Температура смеси на момент укладки в опалубку – не ниже плюс 8°С. Укладка смеси в опалубку – по бетононасосной технологии с применением бетонораспределительной системы.

Характеристика опалубки: фанера влагостойкая ламинированная толщиной 18 мм, коэффициент теплопроводности 0,25 Вт/(м·К), уложенная по деревянным балкам. Теплоизолирующее покрытие – вспененный полиэтилен, коэффициент теплопроводности 0,038 Вт/(м·К).

Параметры термообработки монолитной плиты перекрытия с применением нагревательных прово-

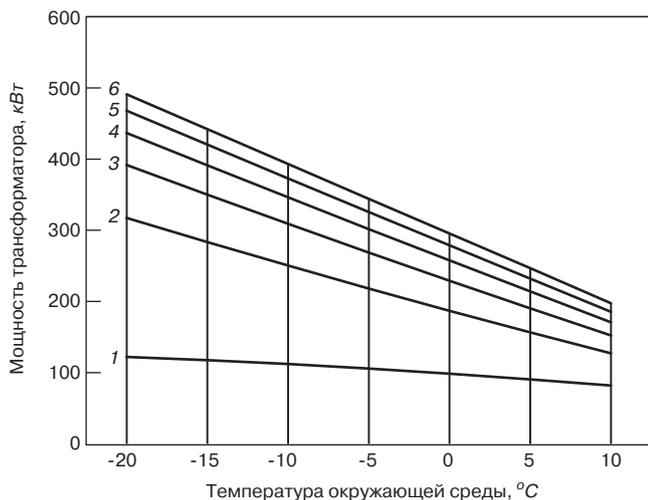


Рис. 1. Требуемая мощность трансформатора в зависимости от погодных условий (без утепления опалубки, с теплоизолирующим покрытием бетона толщиной 50 мм). Скорость ветра, м/с: 1 – 0; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 6; 5 – 8; 6 – 10

Fig. 1. Required transformer power depending on weather conditions (without formwork insulation, with a heat-insulating concrete coating of 50 mm). Wind speeds, m/s: 1 – 0; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 6; 5 – 8; 6 – 10

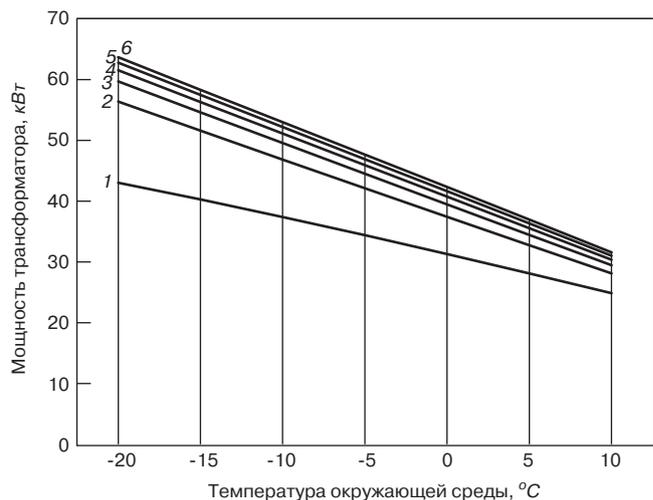


Рис. 2. Требуемая мощность трансформатора в зависимости от погодных условий (с теплоизоляцией опалубки толщиной 50 мм и теплоизолирующим покрытием бетона 100 мм). Скорость ветра, м/с: 1 – 0; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 6; 5 – 8; 6 – 10

Fig. 2. Required transformer power depending on weather conditions (with 50 mm thick formwork insulation and 100 mm concrete heat-insulating coating). Wind speeds, m/s: 1 – 0; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 6; 5 – 8; 6 – 10

дов определяли по методике МДС 12-48.2009 «Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов» с учетом рекомендаций [16]. Характеристика применяемого электрооборудования и материалов:

- трансформаторная подстанция обогрева бетона ТМТО-80/0,38-У1 (номинальная мощность 80 кВА);
- провод нагревательный со стальной жилой, с изоляцией из виниловой оболочки марки ПНСВ сечением 1,2 мм² (среднее значение сопротивления жилы – 0,15 Ом/м);
- гибкий кабель, изготовленный из многопроволочных медных жил КРПТ 3×50 мм (или АПВ-4) – 100 м (в расчете на этаж).

Параметры режима термообработки монолитного бетона принимали с учетом полученных результатов: скорость подъема температуры 2–5°C/ч, температура изотермического обогрева 45°C. Длительность выдерживания бетона перед прогревом, моделируемая в лабораторных условиях в течение 5 ч, в реальных условиях будет включать время на транспортирование, подачу, укладку и уплотнение смеси в объеме технологической захватки.

Расчеты требуемой мощности трансформатора для прогрева бетона при температуре 45°C в зависимости от погодных условий выполнены для двух вариантов: первый – прогрев бетона в неутепленной опалубке с теплоизолирующим покрытием толщиной 50 мм (рис. 1), второй – прогрев бетона с теплоизоляцией опалубки толщиной 50 мм и теплоизолирующим покрытием толщиной 100 мм (рис. 2).

Анализ представленных графиков свидетельствует о существенном влиянии погодных условий (температуры и скорости ветра), а также эффективности теплоизоляции бетона на требуемую мощность электрооборудования и эффективности термообработки в целом.

Выводы

Выполненные исследования показали, что суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе оказывают значительное влияние на прочностные характеристики монолитных бетонов после термообработки. Несмотря на высокую водоредуцирующую способность суперпластификаторов при максимальной дозировке, их количество в составе бетона необходимо назначать с учетом параметров теплового воздействия. Выявленное технологическое противоречие, выражаемое в снижении прочности термообработанного бетона с высоким расходом суперпластификатора, следует решать экспериментальным методом по величине коэффициента эффективности термообработки.

Для интенсификации твердения монолитного бетона с суперпластификаторами на поликарбоксилатной основе рекомендуются следующие параметры термообработки: длительность предварительной выдержки не менее пяти часов, скорость подъема температуры не более 10°C/ч, температура изотермического обогрева не выше 50°C. Продолжительность прогрева при максимальной температуре должна назначаться в зависимости от требуемой распалубочной прочности бетона. Снижение энергозатрат на термообработку монолитного бетона с суперпластификаторами на поликарбоксилатной основе может достигаться при условии использования эффективной теплоизоляции бетона и опалубки.

Список литературы / References

1. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6–14.
1. Bazhenov Yu.M., Cherny`shov E.M., Korotkikh D.N. Construction of structures of modern concrete:

- defining principles and technological platforms. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 3, pp. 6–14. (In Russian).
2. Kastornykh L.I., Trishchenko I.V., Kakljugin A.V., Shershen D.R. Heat curing efficiency estimation of concrete with superplasticizers on polycarboxylates basis. *Materials Science Forum, Materials and Technologies in Construction and Architecture II*. 2019. Vol. 974, pp. 231–236. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.231>
 3. Smirnova O.M. Low-heat steaming treatment of concrete with polycarboxylate superplasticizers. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. № 2 (102). 10213. DOI: 10.34910/MCE.102.13
 4. Османов С.Г., Манойленко А.Ю., Литовка В.В. Выбор вариантов механизации бетонных работ в монолитно-каркасном строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 1. <https://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5507>
 4. Osmanov S.G., Manojlenko A.Yu., Litovka V.V. Selection of options for mechanization of concrete works in monolithic frame construction. *Inzenernyj vestnik Dona*. 2019. No. 1. (In Russian). <https://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5507>
 5. Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Гикало М.А., Трищенко И.В. Особенности состава бетонных смесей для бетононасосной технологии // *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 4–11. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-4-11>
 5. Kastornykh L.I., Kaklyugin A.V., Gikalo M.A., Trishchenko I.V. Features of the composition of concrete mixes for concrete pumping technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 3, pp. 4–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-4-11>
 6. Yamada K., Kim C-B., Ichitsubo K., Ichikawa M. Combined effect of cement characteristics on the performance of superplasticizers. An investigation in real cement plants. *Proceedings of 8-th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*. Sorrento, Italy. October 29 – November 1. ACI SP-239. 2006, pp. 159–174.
 7. Smirnova O.M. Compatibility of portland cement and polycarboxylate-based superplasticizers in high-strength concrete for precast constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 6, pp. 12–22. DOI: 10.5862/MCE.66.2
 8. Lange A., Plank J. Formation of nano-sized ettringite crystals identified as root cause for cement incompatibility of PCE superplasticizers. *Nanotechnology in Construction*. 2015, pp. 55–63. DOI: 10.1007/978-3-319-17088-6_6
 9. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Orlov A.A. Influence of Superplasticizer-Microsilica Complex on Cement Hydration, Structure and Properties of Cement Stone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety 2017, ICCATS 2017*. Chelyabinsk, September 21–22, 2017, 262. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012028
 10. Kastornykh L.I., Kakljugin A.V., Kholodnyak M.G., Osipchuk I.V. Modified concrete mixes for monolithic construction. *Materials Science Forum, Materials and Technologies in Construction and Architecture IV*. 2021. Vol. 1043, pp. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.81>
 11. Kong F.R., Pan L.S., Wang C.M., Zhang D.L., Xu N. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105, pp. 545–553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178>
 12. Nesvetaev G., Koryanova Y., Korchagin I. To the problem of the methodology for evaluating the effectiveness of the use of superplasticizers in concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019*, Sevastopol, 09–13 September 2019, 044056. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044056
 13. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Некоторые вопросы технологии бетонирования массивных фундаментных плит с применением самоуплотняющихся бетонных смесей // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 8. <https://ivdon.ru/magazine/archive/n8y2022/7870>
 13. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Sukhin D.P. Some issues of concreting technology of massive foundation slabs using self-compacting concrete mixtures. *Inzenernyj vestnik Dona*. 2022. No. 8. (In Russian). <https://ivdon.ru/magazine/archive/n8y2022/7870>
 14. Пикус Г.А., Мозгалёв К.М. Контроль параметров бетона, выдерживаемого в зимних условиях // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. Т. 15. С. 6–9.
 14. Pikus G.A., Mozgalyov K.M. Control of the parameters of concrete maintained in winter conditions. *Vestnik Bulletin of the South Ural State University. Series «Architecture and construction»*. 2015. No. 1. Vol. 15, pp. 6–9. (In Russian).
 15. Мухаметгалеев Т.Х., Бикбулатов Р.И., Пирогова А.М. Автоматизация расчета параметров греющего провода при зимнем бетонировании // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 12. <https://ivdon.ru/magazine/archive/n12y2022/8041>
 15. Mukhametgaleev T.X., Bikbulatov R.I., Pirogova A.M. Automation of calculation of heating wire parameters during winter concreting. *Inzenernyj vestnik Dona*. 2022. No. 12. (In Russian). <https://ivdon.ru/magazine/archive/n12y2022/8041>
 16. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / Под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездава. М.: НИИЖБ, 2005. 276 с.
 16. Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnykh konstruktivnykh [Guidelines for heating concrete in monolithic structures] / edited by Krylov B.A., Ambarcuzmyan S.A., Zvezdov A.I. Moscow: NIIZhB, 2005. 276 p.

С.С. КАПРИЕЛОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (kapriellov@mail.ru);
А.В. ШЕЙНФЕЛЬД¹, д-р техн. наук, советник РААСН,
Н.М. СЕЛЮТИН², инженер (selyutin@masterbeton-mb.ru)

¹ Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева
АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, корп. 5)

² ООО «Предприятие Мастер Бетон» (109518, г. Москва, ул. Саратовская, 31)

Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 — новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий

Представлены результаты исследований влияния разновидностей керамзитового заполнителя (песка фракции 0–5 мм и гравия фракции 5–10 мм) марок по насыпной плотности М250–М1000 и прочности П35–П350 на среднюю плотность, прочность при сжатии и начальный модуль упругости легких бетонов классов В16–В65 с марками по средней плотности D1300–D2000. Работы проводились с целью получения высокопрочного легкого керамзитобетона классов В50–В65 из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с использованием доступных для стройиндустрии легких заполнителей. Для приготовления легких бетонов использовали портландцемент ЦЕМ 0 52,5 Н, органоминеральный модификатор МБ10-50С, природный песок с $M_k=2,5$, керамзитовый песок и гравий трех различных производителей с насыпной плотностью 221–910 кг/м³ и прочностью 0,6–8,9 МПа. Установлено, что при близких по значению объемных дозировках компонентов бетонных смесей влияние свойств (плотности и прочности) керамзитового заполнителя на характеристики легких бетонов имеет сходный характер. Введение в составы бетонных смесей тяжелого природного песка взамен легкого керамзитового усиливает эффект повышения прочности и плотности бетонов. Минимальное значение прочности керамзитового заполнителя, при котором обеспечивается прочность бетона при сжатии, соответствующая классу В50 с маркой по средней плотности D1600, должно соответствовать марке П150. С повышением прочности керамзитового заполнителя до уровня, соответствующего марке П300, прочность бетона повышается до значений, соответствующих классу В65 с маркой по средней плотности D2000. Получены самоуплотняющиеся и высокоподвижные легкие бетоны марок по средней плотности D1600–D2000, классов по прочности при сжатии В50–В65 со следующими характеристиками соответственно: прочность при сжатии (кубиковая прочность) 60,3–74,5 МПа; прочность при осевом сжатии (призменная прочность) 53,7–73,5 МПа; начальный модуль упругости 21,2–25,8 ГПа, которые выходят за пределы классификационного ряда легких бетонов, предусмотренных сводом правил СП 63.13330.2018.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, самоуплотняющийся легкий бетон, керамзитовый заполнитель, прочность при сжатии, средняя плотность, начальный модуль упругости.

Авторы выражают благодарность А.В. Епищенко (ООО «Октябрьский керамзит») и Р.Ф. Саммасову (ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия») за предоставленные образцы керамзитовых заполнителей, а также Е.В. Панкратовой за участие.

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Селютин Н.М. Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 — новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>

S.S. KAPRIELOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of the RAACS (kapriellov@mail.ru),
A.V. SHEYNFELD¹, Doctor of Sciences (Engineering), RAASN Advisor (sheynfeld@masterbeton-mb.ru);
N.M. SELYUTIN², Engineer, (selyutin@masterbeton-mb.ru)

¹ Scientific Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev JSC "Research Center of Construction"
(6, bldg. 5, 2nd Institutskaya Street, Moscow 109428, Russian Federation)

² LLC "Master Concrete Enterprise" (31, Saratovskaya Street, 109518, Moscow, Russian Federation)

Self-Compacting High-Strength Expanded Clay Concrete of B50-B65 Classes — a New Generation of Expanded Clay Concretes for Structures of High-Rise Building

The results of studies of the influence of expanded clay aggregate varieties (sand of fractions of 0–5 mm and gravel of fractions of 5–10 mm) of grades according to bulk density M250–M1000 and strength P35–P350 on the average density, compressive strength and initial modulus of elasticity of lightweight concrete of classes B16–B65 with average density grades D1300–D2000. The work was carried out in order to obtain high-strength lightweight expanded clay concrete of classes B50–B65 from highly mobile and self-compacting mixtures using light aggregates available for the construction industry. For the preparation of light concretes, Portland cement CEM 0 52.5 N, organo-mineral modifier MB10-50C, natural sand with $M_k=2.5$, expanded clay sand and gravel from three different manufacturers with a bulk density of 221–910 kg/m³ and a strength of 0.6–8.9 MPa were used. It has been established that with similar volumetric dosages of the components of concrete mixtures, the nature of the influence of the properties (density and strength) of expanded clay filler on the characteristics of lightweight concrete is similar. The introduction of heavy natural sand into the composition of concrete mixes instead of light expanded clay enhances the effect of increasing the strength and density of concrete. The minimum value of the strength of expanded clay filler, which ensures the compressive strength of concrete corresponding to class B50 with a grade of average density D1600, must correspond to grade P150. With an increase in the strength of expanded clay filler to a level corresponding to the P300 grade, the concrete strength increases to values corresponding to the B65 class with a D2000 average density grade. Self-compacting and highly mobile lightweight concretes of medium density grades D1600–D2000, compressive strength at compression (cube strength) 60.3–74.5 MPa; compressive strength at axial compression (prismatic strength) 53.7–73.5 MPa; initial modulus of elasticity 21.2–25.8 GPa, which go beyond the classification range of light concrete provided for in the code of rules SP 63.13330.2018.

sive strength classes B50–B65 with the following characteristics were obtained, respectively: compressive strength (cubic strength) 60.3–74.5 MPa, axial compression strength (prismatic strength) 53.7–73.5 MPa, initial modulus of elasticity 21.2–25.8 GPa, which go beyond the classification range of light concretes provided for by the Code of Rules of SP 63.13330.2018.

Keywords: high-strength lightweight concrete, self-compacting lightweight concrete, expanded clay aggregate, compressive strength, average density, initial modulus of elasticity.

The authors are grateful to A.S. Epishchenko (Oktyabrsky Keramzit LLC) and R. F. Sammasov (Vinzilinskiy Plant of Expanded Clay Gravel LLC) for providing samples of expanded clay aggregates, and also E.V. Pankratova for participation.

For citation: Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Selyutin N.M. Self-compacting high-strength expanded clay concrete of B50–B65 classes – a new generation of expanded clay concretes for structures of high-rise building. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 42–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>

Накопленный в последние годы опыт массового производства и применения бетонов классов от B60 до B110 [1–3] и актуализированная в связи с этим нормативно-техническая база для использования тяжелых и мелкозернистых бетонов нового поколения (ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», ГОСТ 31914–2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества», СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») являются основой для получения модифицированных легких конструктивных бетонов, отличающихся высокой прочностью и улучшенными реологическими свойствами.

В настоящее время есть противоречие между действующим ГОСТ 25820–2021 «Бетоны легкие. Технические условия», в котором классификационный ряд легких бетонов по средней плотности ограничивается предельной маркой D2000 и классом по прочности при сжатии – B60 и основным нормативным документом по проектированию СП 63.13330.2018, где класс легких бетонов ограничен – не выше B40. Соответственно для легких бетонов классов более B40 отсутствуют основные нормативные прочностные и деформационные характеристики – предел прочности при осевом сжатии R_b и начальный модуль упругости E_b . При этом очевидно, что повышение класса до B60–B65 с улучшением деформационных характеристик и сохранением средней плотности на уровне марок D1900–D2000 сделает легкий бетон эффективным материалом, позволяющим снижать массу несущих

конструкций, что особенно актуально при строительстве высотных зданий.

Примером может послужить опыт возведения в 2006 г. в г. Москве 25-этажного здания «Gazoil Plaza» высотой 96 м с несущими конструкциями стен, колонн и перекрытий из конструктивного керамзитобетона (рис. 1) марки по плотности D1800 и фактическими значениями классов по прочности при сжатии Bф45–Bф50 [4–6].

Как известно, ключевым фактором получения высокопрочных бетонов является модифицирование структуры наиболее активного компонента бетонов – цементного камня, направленное на изменение баланса между гидратными новообразованиями в сторону преобладания более прочных из них, и на изменение баланса между порами микро- и макроуровня дисперсности с уменьшением доли вторых [6–8]. Далее по значимости – такие факторы, как физико-технические свойства заполнителей и соотношение компонентов бетона [9, 10].

Механизм управления фазовым составом и дифференциальной пористостью цементного камня основан на совместном использовании, в разных комбинациях, высокоактивных минеральных добавок (в частности, микрокремнезема, золы-уноса, метакаолина), суперпластификаторов или комплексных продуктов на их основе – органоминеральных модификаторов типа МБ по ГОСТ Р 56178–2014 «Модификаторы органоминеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия». Так, при использовании цементов типа ЦЕМ I в сочетании с вышеуказанными добавками возможно получение высокопрочных цементных систем с пределами прочности при сжатии до 130 МПа – при твердении в нормальных условиях и 190 МПа – при дополнительной тепловой обработке [11].

Факторы, влияющие на характеристики портландцементного камня и способы получения высокопрочной структуры, достаточно изучены [12]. При этом роль вида, свойств и объемного содержания заполнителей в управлении прочностными и деформационными свойствами высокопрочного легкого бетона остается важной, требующей исследований.

Получению высокопрочных легких бетонов посвящены исследования многих специалистов, среди которых стоит выделить работы, связанные с оценкой влияния вида и характеристик заполнителя на структуру и свойства бетонов [13–17]. Большинство из них касается бетонов прочностью при сжатии около 70 МПа, плотностью до 2000 кг/м³, но есть исклю-



Рис. 1. Несущие конструкции стен, колонн и постнатяженных перекрытий пролетом 8 м здания «Gazoil Plaza» (Москва) из конструктивного легкого бетона фактических классов Bф45–Bф50

Fig. 1. Supporting structures of walls, columns and poststressed floors with a span of 8 m building «Gazoil Plaza» (Moscow) from structural lightweight concrete actual classes B45–B50

чения. В частности, J-X. Lu и др. [14], используя для получения высокопрочного цементного камня цемент ЦЕМ I 52,5, микрокремнезем и микросферы, а в качестве легкого заполнителя – вспученный сланец, получили бетоны прочностью от 64 до 123 МПа с плотностью 1744–1929 кг/м³.

Соотношение объемов смешанного вяжущего (цемент + минеральные добавки) и легкого заполнителя является важным фактором, влияющим на прочность и кинетику твердения высокопрочного легкого бетона. При производстве бетонных смесей с осадкой конуса 13–23 см с использованием крупного легкого заполнителя – вспученного сланца фракции до 20 мм – и тяжелого песка, по данным H.S. Wilson и V.M. Malhotra [13], минимальный расход («порог эффективной дозировки») вяжущего, при котором предел прочности при сжатии бетона плотностью до 2000 кг/м³ достигает максимального значения – 67 МПа, должен быть на уровне 638 кг/м³.

Значение фракционного состава, формы и размера заполнителей в изменении прочности и трещиностойкости высокопрочного легкого бетона отмечено в [15–17]. Заслуживает внимания оценка значимости формы легкого заполнителя (сферической, продолговатой, угловатой) по критерию «коэффициент формы», который определяется отношением максимального диаметра круга, описывающего зерна заполнителя, к минимальному размеру заполнителя. Установлено (H.Z. Cui и др.), что при «коэффициенте формы» выше 2,2 (по существу, это степень отклонения от идеальной сферы с коэффициентом 1) прочность и модуль упругости легкого бетона понижаются [17].

С учетом вышеизложенного поставлена цель: получение высокопрочного легкого керамзитобетона классов от В50 до В65 из высокоподвижных (ОК>20 см) и самоуплотняющихся (РК=55–70 см) смесей с исследованием влияния качества керамзитового заполнителя на его прочностные и деформационные характеристики.

Материалы и методы испытаний

Характеристики материалов

Для приготовления легких бетонов в лабораторных условиях использовали следующие материалы: це-

мент, модификатор, природный песок, керамзитовый песок и гравий трех различных производителей: АО «Керамзит» (г. Рязань); ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара). Основанием для выбора трех разных производителей керамзитового заполнителя являлись различия в их насыпной плотности (от 221 до 910 кг/м³) и прочности (от 0,6 до 8,9 МПа).

Характеристики используемых материалов приводятся ниже:

– портландцемент ЦЕМ0 52,5Н с нормальной густотой 24,6% и содержанием С₃А – 4,9%, производства АО «Новоросцемент», соответствующий требованиям ГОСТ 31108–2020;

– органоминеральный модификатор бетона МБ10-50С А-II-2, включающий в себя микрокремнезем (45%), золу-уноса (45%) и суперпластификатор (10%) [15], производства ООО «Предприятие Мастер Бетон», соответствующий требованиям стандарта РФ ГОСТ Р 56178–2014 и ТУ 5743-083-46854090–98 с изм. № 1–3;

– песок кварцевый I класса фракции 0–5 мм с модулем крупности М_{кр}=2,5, истинной плотностью 2650 кг/м³ и содержанием пылевидных и глинистых частиц 0,95% производства ООО «Мансуровское карьероуправление», соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93;

– песок керамзитовый фракции 0–5 мм марок по насыпной плотности М250, М800, М1000 и марок по прочности П35, П150 и П350 производства соответственно АО «Керамзит» (г. Рязань); ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара), соответствующий требованиям ГОСТ 32496–2013;

– гравий керамзитовый фракции 5–10 мм марок по насыпной плотности М250, М800, М900 и марок по прочности П35, П150 и П300 производства соответственно АО «Керамзит» (г. Рязань); ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара), соответствующий требованиям ГОСТ 32496–2013.

Физико-технические характеристики керамзитового песка и гравия различных производителей представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Физико-технические характеристики керамзитового заполнителя различных производителей
Physical and technical characteristics of expanded clay aggregate from various manufacturers

Показатель качества	Производитель керамзитового заполнителя фракций					
	АО «Керамзит» (г. Рязань)		ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень)		ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара)	
	0–5 мм	5–10 мм	0–5 мм	5–10 мм	0–5 мм	5–10 мм
Марка по насыпной плотности	М250	М250	М800	М800	М1000	М900
Насыпная плотность, кг/м ³	234	221	727	750	910	835
Марка по прочности	П35	П35	П150	П150	П350	П300
Прочность, МПа	0,7	0,6	3,95	4,1	8,9	7,6
Водопоглощение, %	27,5	31,69	20,63	14,89	16,94	11,97

Таблица 2
Table 2Составы и свойства бетонных смесей
Compositions and properties of concrete mixtures

№ серии	№ состава	Производитель керамзитового заполнителя	Дозировка компонентов на 1 м ³ смеси					Характеристики бетонной смеси			
			Ц, кг/м ³	МБ, кг/м ³	П, кг/м ³	КП, кг/м ³ / м ³	КГ, кг/м ³ / м ³	В, л/м ³	В/(Ц+МБ)	γ, кг/м ³	ОК / РК, см
1	1	ОК (г. Самара)	530	127	625	–	625 / 0,36	149	0,23	2057	– / 69
	2	ВЗКГ (г. Тюмень)	501	120	591	–	591 / 0,39	153	0,25	1956	– / 60
	3	«Керамзит» (г. Рязань)	526	126	621	–	159 / 0,37	147	0,23	1580	– / 58
2	4	ОК (г. Самара)	548	88	647	–	647 / 0,37	150	0,24	2080	– / 67
	5	ВЗКГ (г. Тюмень)	513	82	606	–	606 / 0,4	162	0,27	1969	– / 57
	6	«Керамзит» (г. Рязань)	548	88	646	–	165 / 0,38	153	0,24	1600	– / 55
3	7	ОК (г. Самара)	593	142	–	398 / 0,23	597 / 0,34	174	0,24	1904	25 / –
	8	ВЗКГ (г. Тюмень)	518	124	–	348 / 0,23	522 / 0,34	169	0,26	1681	21 / –
	9	«Керамзит» (г. Рязань)	680	163	–	120 / 0,28	181 / 0,42	173	0,21	1318	21 / –

Примечания: ОК – ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара); ВЗКГ – ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); «Керамзит» – АО «Керамзит» (г. Рязань); Ц – портландцемент; МБ – органоминеральный модификатор; П – песок природный; КП – керамзитовый песок; КГ – керамзитовый гравий; В – вода затворения; γ – средняя плотность бетонной смеси; ОК – осадка нормального конуса; РК – распылв нормального конуса.

Составы и свойства бетонных смесей

В лабораторных условиях НИИЖБ из вышеуказанных материалов приготовлены три серии (по три состава смеси в каждой) легкого бетона с разным сочетанием заполнителей. Первая и вторая серии (шесть составов) – с использованием природного песка и керамзитового гравия с объемной дозировкой гравия – 0,36–0,4 м³/м³, с расходом цемента – 501–548 кг/м³ и дозировкой модификатора МБ 10-50С – 16 и 24% от массы цемента. Третья серия (три состава) – из смесей с использованием керамзитовых песка и гравия с суммарной объемной дозировкой 0,57–0,7 м³/м³, с расходом цемента 518–680 кг/м³ и дозировкой модификатора МБ 10-50С – 24% от массы цемента.

Каждая серия приготавливалась с использованием керамзитового заполнителя различного качества трех разных производителей.

Составы бетонных смесей в каждой серии подбирались с расчетом на примерно одинаковую объемную дозировку керамзитового заполнителя. Составы и свойства бетонных смесей представлены в табл. 2. Бетонные смеси объемом 20 л приготавливались в смесителе принудительного действия с перемешиванием каждого замеса в течение 5 мин.

Результаты испытаний показали (табл. 2), что средняя плотность бетонных смесей (γ) в зависимости от насыпной плотности и дозировки выбранных керамзитовых заполнителей изменяется в широком диапазоне – от 1318 до 2080 кг/м³.

Подвижность смесей с использованием природного песка и керамзитового гравия (серии 1 и 2, составы 1–6, табл. 2), определенная по распылу нормального конуса по ГОСТ Р 59715–2022, находится в диапазоне от 55 до 69 см. С учетом отсутствия признаков водоотделения и расслоения все смеси этой серии согласно ГОСТ Р 59714–2021 можно отнести к категории самоуплотняющихся.

Подвижность смесей с использованием керамзитового песка и гравия (серия 3, составы 7–9, табл. 2), определенная по осадке нормального конуса по ГОСТ 10181–2014, находится в диапазоне от 21 до 25 см. Это позволяет отнести их к категории высокоподвижных смесей с маркой по удобоукладываемости П5 по ГОСТ 7473–2010.

Объект исследований и методы испытаний

Из приготовленных бетонных смесей формовались образцы-кубы размером 100×100×100 мм в количестве 3 шт. для определения кубиковой прочности бетона при сжатии (R) по ГОСТ 10180 и ГОСТ 31914 и 3 шт. для определения средней плотности бетона в сухом состоянии (D) по ГОСТ 12730.1, а также образцы-призмы размером 100×100×400 мм в количестве 3 шт. для определения призмочной прочности бетона при сжатии (R_b) и начального модуля упругости (E_b) по ГОСТ 24452 и ГОСТ 31914.

Контрольные образцы хранились 28 сут до испытаний в нормальных температурно-влажностных условиях (температура плюс 20±2°C, влажность 95±5%).

Начальный модуль упругости определяли по трем образцам-призмам. Нагружение образцов-призм производилось ступенями, равными 0,1 R_b , до уровня 40% R_b с выдерживанием под нагрузкой на каждой ступени по 5 мин.

Значение кубиковой и призмочной прочности, средней плотности, а также начального модуля упругости легкого бетона принималось как среднее значение результатов испытаний всех трех образцов.

Фактический класс легких бетонов по прочности при сжатии ($V_{ф}$) определялся в соответствии с ГОСТ 18105 с учетом требований ГОСТ 31914 к минимальному значению коэффициента требуемой прочности $K_T=1,14$ (при коэффициенте вариации $V=10\%$) по формуле:

Таблица 3
Table 3

Физико-технические характеристики легких бетонов в возрасте 28 сут.
Physical and technical characteristics of lightweight concrete of 28 days

№ серии	№ состава	Производитель керамзитового заполнителя	Физико-технические характеристики легких бетонов						
			$\gamma_{\text{сух}}$, кг/м ³	D , кг/м ³	R , МПа	R_b , МПа	R_b/R	V_f , МПа	E_b , ГПа
1	1	ОК (г. Самара)	1968	2000	74,5	73,5	0,98	65	24,5
	2	ВЗКГ (г. Тюмень)	1868	1900	74	73,1	0,99	65	25,8
	3	Керамзит (г. Рязань)	1543	1600	26,4	25,3	0,96	23	21,6
2	4	ОК (г. Самара)	1948	2000	73,9	70,4	0,95	65	24,8
	5	ВЗКГ (г. Тюмень)	1866	1900	71,2	70,4	0,99	62	25,6
	6	Керамзит (г. Рязань)	1556	1600	27,8	25,2	0,91	24	23,3
3	7	ОК (г. Самара)	1765	1800	66,2	60,5	0,91	58	23,2
	8	ВЗКГ (г. Тюмень)	1560	1600	60,3	53,7	0,89	52	21,2
	9	Керамзит (г. Рязань)	1316	1300	19,1	16,4	0,86	16	13,6

Примечания. ОК – ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара); ВЗКГ – ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); Керамзит – АО «Керамзит» (г. Рязань); $\gamma_{\text{сух}}$ – средняя плотность в сухом состоянии; D – марка по средней плотности; R – кубиковая прочность при сжатии; R_b – призмная прочность при сжатии; R_b/R – коэффициент призмной прочности; V_f – фактический класс по прочности при сжатии; E_b – начальный модуль упругости.

$$V_f = \frac{R}{K_T} = \frac{R}{1,14}, \quad (1)$$

где R – кубиковая прочность бетона при сжатии, МПа.

Результаты испытаний и дискуссия

Результаты испытаний легких бетонов с керамзитовым заполнителем трех разных производителей по показателям: средняя плотность в сухом состоянии ($\gamma_{\text{сух}}$) и марка по средней плотности (D), кубиковая (R) и призмная (R_b) прочность при сжатии, коэффициент призмной прочности (R_b/R), фактический класс (V_f) и начальный модуль упругости (E_b) в возрасте 28 сут представлены в табл. 3.

Средняя плотность

Средняя плотность бетонов в сухом состоянии в зависимости от насыпной плотности заполнителя изменяется в широком диапазоне – от 1316 до 1968 кг/м³ (рис. 2), что соответствует требованиям ГОСТ 25820–2021 к легким бетонам и совпадает с тенденцией изменения средней плотности бетонных смесей, из которых приготовлены образцы (табл. 1).

По характеру кривых на рис. 2 можно судить о значимости объемной дозировки легкого заполнителя и суммарного расхода вяжущего (Цемент+МБ).

При использовании только легких керамзитовых заполнителей (песка и гравия) с объемной дозировкой в диапазоне 0,57–0,7 м³/м³, при расходе вяжущего 642–843 кг/м³, средняя плотность бетонов в зависимости от плотности заполнителя составляет 1316–1765 кг/м³, что соответствует маркам по средней плотности D1300–D1800. (Серия бетонов 3, табл. 3).

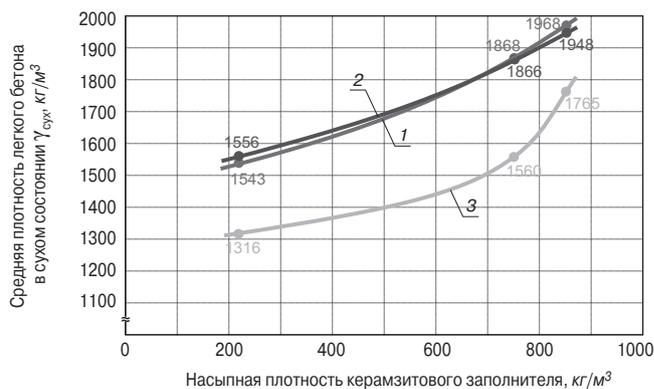
При сочетании в составе бетонов легкого керамзитового гравия (объемная дозировка 0,36–0,4 м³/м³) с тяжелым природным песком вместо легкого керамзитового, при уменьшенном расходе вяжущего – 595–657 кг/м³, плотность бетонов, как ожидалось,

повышается и составляет 1543–1968 кг/м³, что соответствует маркам по средней плотности D1600–D2000. (Серии бетонов 1 и 2, табл. 3).

Кубиковая прочность

Кубиковая прочность при сжатии (R) легких бетонов в возрасте 28 сут. находится в прямой зависимости от насыпной плотности и прочности легкого заполнителя (рис. 3). Присутствие в составе бетонов тяжелого природного песка вместо легкого керамзитового способствует приросту прочности (серии 1 и 2, рис. 3). При этом влияние на прочность бетонов разных песков – природного или керамзитового – представляется не столь значительным, как влияние свойств керамзитового гравия.

Значения прочности бетонов всех трех серий в возрасте 28 сут, приготовленных с разными видами



- 1 – 1-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=24% массы цемента
- 2 – 2-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=16% массы цемента
- 3 – 3-я серия бетонов на керамзитовом песке и гравии с МБ=24% массы цемента

Рис. 2. Зависимость средней плотности легкого бетона в сухом состоянии от насыпной плотности керамзитового заполнителя
Fig. 2. Dependence of the average density of lightweight concrete in a dry state on the bulk density of expanded clay aggregate

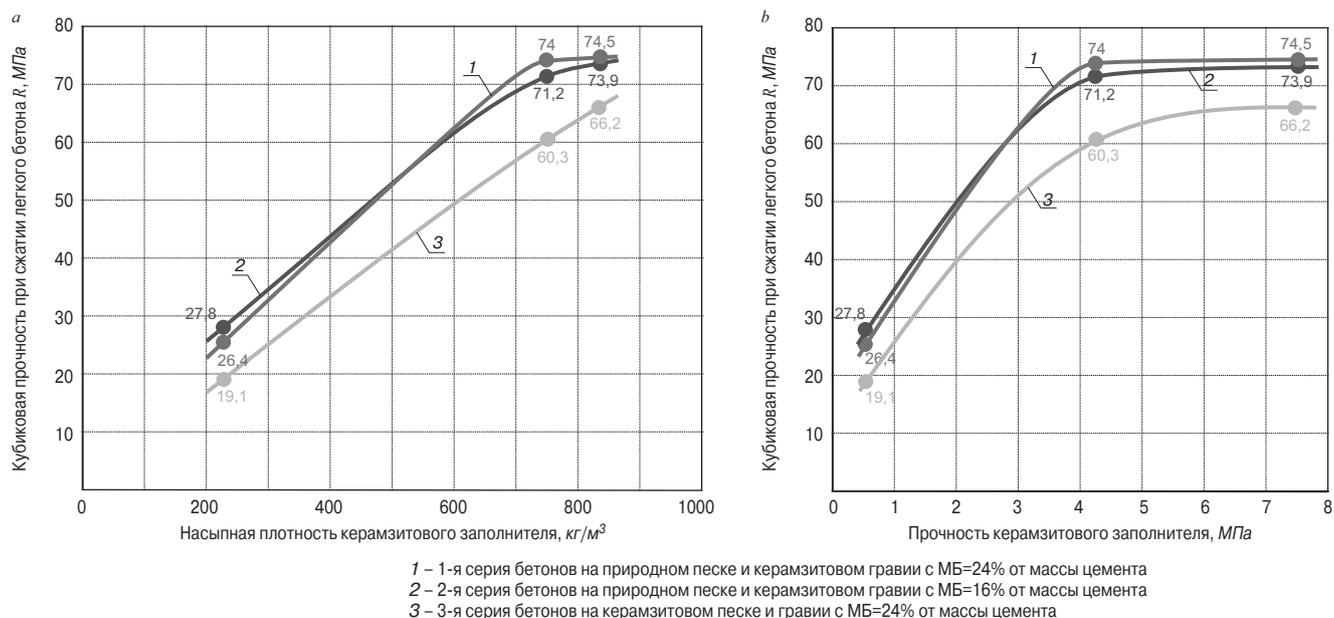


Рис. 3. Зависимость кубиковой прочности легкого бетона от насыпной плотности (а) и прочности (b) керамзитового заполнителя
Fig. 3. Dependence of the cubic strength of lightweight concrete on bulk density (a) and strength (b) expanded clay aggregate

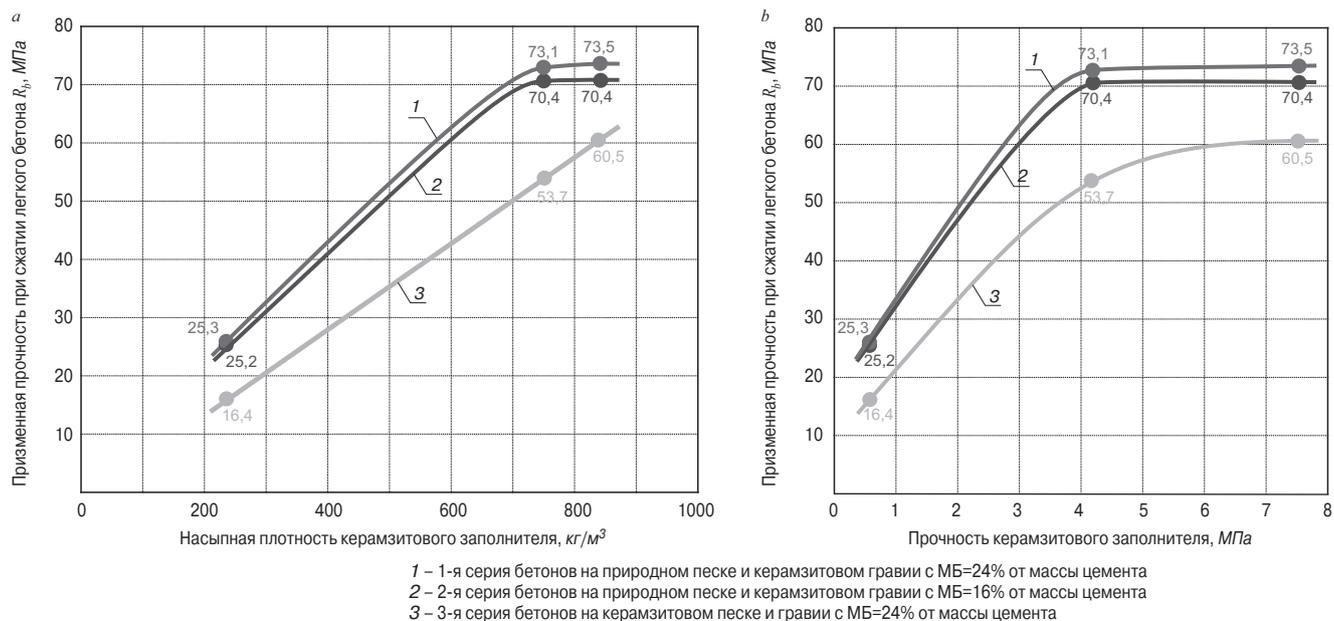


Рис. 4. Зависимость призмной прочности легкого бетона от насыпной плотности (а) и прочности (b) керамзитового заполнителя
Fig. 4. Dependence of the prism strength of lightweight concrete on bulk density (a) and strength (b) expanded clay aggregate

песка, в зависимости от плотности и прочности заполнителей находятся в следующих диапазонах:

– 19,1–27,8 МПа (фактические классы В_ф16–В_ф24, марки по средней плотности D1300–D1600) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 221–234 кг/м³ и прочностью 0,6–0,7 МПа;

– 60,3–74,5 МПа (фактические классы В_ф52–В_ф65, марки по средней плотности D1600–D1900) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 727–750 кг/м³ и прочностью 3,95–4,10 МПа;

– 66,2–74,5 МПа (фактические классы В_ф58–В_ф65, марки по средней плотности D1600–D2000) –

при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 835–910 кг/м³ и прочностью 7,6–8,9 МПа.

Представленные выше результаты показывают, что использование при производстве бетонных смесей керамзитового гравия прочностью менее 4,1 МПа, т. е. марки по прочности ниже П150 в сочетании как с природным песком из плотных пород, так и с керамзитовым песком не обеспечивает решения задачи получения высокопрочного легкого бетона классов В50–В65. При этом повышение прочности керамзитового гравия до 7,6 МПа (марка по прочности П300) не приводит к увеличению прочности самоуплотняющегося легкого бетона на природном песке и керамзитовом

гравии (рис. 3, б). Это, по-видимому, можно объяснить тем, что при прочности легкого бетона 70–74 МПа с объемом керамзитового гравия 0,36–0,4 м³ основную нагрузку воспринимает растворная часть структуры бетона, прочность которой может достигать 120–130 МПа (при дозировке МБ 16–24% массы цемента и $V/(Ц+МБ)=0,23–0,27$), а прочности керамзита на уровне 4,1 МПа достаточно, чтобы перераспределять напряжения в структуре бетона. При увеличении объема керамзитового заполнителя до 0,57 м³ в составе бетона повышение его прочности до 7,6 МПа уже сказывается и прочность легкого бетона возрастает на 10%, от 60,3 до 66,2 МПа (рис. 3, б). Полученные результаты показывают связь прочности с объемным содержанием керамзитового заполнителя в составе смеси и их влияние на прочностные характеристики высокопрочных легких бетонов.

Призменная прочность

Представленные на рис. 4 зависимости показывают, что тенденции изменения призменной прочности при сжатии (R_b) легких бетонов в возрасте 28 сут соответствует изменению кубиковой прочности. Значения призменной прочности бетонов всех трех серий в возрасте 28 сут, приготовленных с разными видами песка, в зависимости от плотности и прочности заполнителей находятся в следующих диапазонах:

– 16,4–25,3 МПа (у бетонов классов В_ф16–В_ф24, марок по средней плотности D1300–D1600) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 221–234 кг/м³ и прочностью 0,6–0,7 МПа;

– 53,7–73,1 МПа (у бетонов классов В_ф52–В_ф65, с маркой по средней плотности D1600–D1900) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 727–750 кг/м³ и прочностью 3,95–4,1 МПа;

– 60,5–73,5 МПа (у бетонов классов В_ф58–В_ф65 с маркой по средней плотности D1600–D2000) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 835–910 кг/м³ и прочностью 7,6–8,9 МПа.

Оценка вышеизложенных результатов по критерию «коэффициент призменной прочности», определяемому отношением R_b/R , показывает, что фактические значения коэффициента находятся в диапазоне от 0,86 до 0,99. Это значительно превосходит значения этого коэффициента, рассчитанного по параметрам, приведенным в СП 63.13330.2018 (от 0,7 до 0,77), и приводит к выводу, что расчет железобетонных конструкций по прочности, выполняемый на основании нормируемых и расчетных характеристик легких бетонов согласно табл. 6.7 СП 63.13330.2018, по существу, приводит к значительным запасам их несущей способности.

Начальный модуль упругости

Результаты определения и зависимости начального модуля упругости (E_b) от насыпной плотности керамзитового гравия фактических классов легких бетонов В_ф16–В_ф65 прочностью при сжатии 19,1–74,5 МПа представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Полученные результаты (рис. 5) показывают, что начальный модуль упругости легких бетонов в значительной степени зависит от сочетания объема керамзитового заполнителя в составе смеси и его характеристик (насыпной плотности и прочности), в частности:

– начальный модуль упругости легких бетонов фактических классов В_ф23–В_ф65 (прочностью 26,4–74,5 МПа) с марками по плотности D1600–D2000 (средней плотностью 1543–1968 кг/м³) из самоуплотняющихся смесей с использованием природного песка и керамзитового гравия в объеме 0,36–0,4 м³ находится в достаточно узком диапазоне от 21,6 до 25,8 ГПа (серии 1 и 2, рис. 5) и при изменении характеристик керамзита (насыпной плотности от 221 до 835 кг/м³ и прочности от 0,6 до 7,6 МПа) повышается всего на 10–15%;

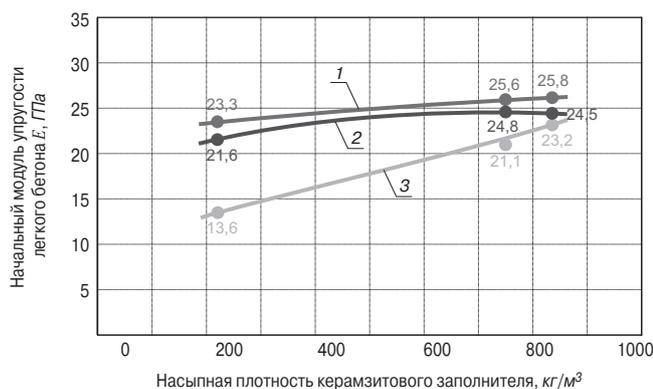
– начальный модуль упругости легких бетонов фактических классов В_ф16–В_ф58 (прочностью 19,1–66,2 МПа) с марками по плотности D1300–D1800 (средней плотностью 1316–1765 кг/м³) из высокоподвижных смесей с использованием керамзитового песка и гравия в объеме 0,57–0,7 м³ находится в более широком диапазоне от 13,6 до 23,2 ГПа (серия 3, рис. 5) и при изменении характеристик керамзита (насыпной плотности от 221 до 835 кг/м³ и прочности от 0,6 до 7,6 МПа) повышается значительно, на 55–70%.

Полученные результаты показывают, что при оценке деформационных характеристик легких бетонов необходимо учитывать взаимосвязь характеристик (плотности и прочности) керамзита и его объемного содержания в составе смеси. Так, при увеличении объемного содержания керамзитового заполнителя в составе бетона от 0,4 до 0,7 м³/м³ влияние его характеристик на значение начального модуля упругости значительно повышается.

Данное обстоятельство дает возможность управлять значением начального модуля упругости легких бетонов, который при одних и тех же классах по прочности и марках по средней плотности может находиться в широком диапазоне, что можно наблюдать на примере легких бетонов на керамзитовом заполнителе с маркой по насыпной плотности М250 и маркой по прочности П35:

– начальный модуль упругости легкого бетона класса В_ф16 с маркой по плотности D1300 с использованием керамзитового заполнителя в объеме 0,7 м³ составляет 13,6 ГПа и превосходит на 18% нормативное значение начального модуля упругости (11,5 ГПа) для легкого бетона соответствующего класса по прочности и марки по средней плотности согласно табл. 6.11 СП 63.13330.2018;

– начальный модуль упругости легких бетонов классов В_ф23 и В_ф24 с маркой по плотности D1600 с использованием керамзитового заполнителя в объеме 0,37 и 0,38 м³ составляет 21,6 и 23,3 ГПа и превосходит на 34 и 43% нормативное значение начального модуля упругости (16,1 и 16,3 ГПа) для легкого



- 1 – 1-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=24% от массы цемента
 2 – 2-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=16% от массы цемента
 3 – 3-я серия бетонов на керамзитовом песке и гравии с МБ=24% от массы цемента

Рис. 5. Зависимость начального модуля упругости легкого бетона от насыпной плотности керамзитового заполнителя

Fig. 5. Dependence of the initial modulus of elasticity of lightweight concrete on bulk density of expanded clay aggregate

бетона соответствующих классов по прочности и марки по средней плотности согласно табл. 6.11 свода правил СП 63.13330.2018.

Выводы

1. Исследовано влияние разновидностей керамзитового заполнителя (песка фракции 0–5 мм и гравия фракции 5–10 мм) марок по насыпной плотности М250, М800, М900, М1000 и марок по прочности П35, П150, П300, П350 на среднюю плотность, предел прочности при сжатии и начальный модуль упругости легких бетонов. Установлено, что при близких по значению объемных дозировках компонентов бе-

тонных смесей характер влияния свойств (плотности и прочности) керамзитового заполнителя на вышеуказанные характеристики легких бетонов имеет сходный характер. Введение в составы бетонных смесей тяжелого природного песка взамен легкого керамзитового усиливает эффект повышения прочности и плотности бетонов.

2. Минимальное значение прочности керамзитового заполнителя, при котором обеспечивается прочность бетона при сжатии, соответствующая классу В50 с маркой по средней плотности D1600, должно соответствовать марке П150. С повышением прочности керамзитового заполнителя до уровня, соответствующего марке П300, прочность бетона повышается до значений, соответствующих классу В65 с маркой по средней плотности D2000.

3. На основании выявленных зависимостей получены самоуплотняющиеся и высокоподвижные (соответствующие марке по удобоукладываемости П5) легкие бетоны марок по средней плотности D1600–D2000, классов по прочности при сжатии от В50 до В65 со следующими характеристиками соответственно: предел прочности при осевом сжатии (R_b) – от 53,7 до 73,5 МПа, начальный модуль упругости (E_b) – от 21,2 до 25,8 ГПа.

4. Полученные самоуплотняющиеся и высокоподвижные легкие бетоны классов В50–В65 выходят за пределы классификационного ряда легких бетонов и обладают характеристиками, значительно превышающими нормативные, предусмотренные сводом правил СП 63.13330.2018. Это является основанием для продолжения исследований прочностных и деформационных свойств легких бетонов с целью внесения изменений в указанный свод правил.

Список литературы

- Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 1. С. 18–24.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С., Амиров Р.А. Технология возведения конструкций каркасов высотных зданий из высокопрочных бетонов классов В60–В100 // *Вестник НИИ «Строительство»*. 2022. № 33 (2). С. 106–121. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121).
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.

References

- Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of classes В80 and В90 in monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 9–13. (In Russian).
- Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S. Experience in the production and quality control of high-strength concretes at the construction of the high-rise complex “OKO” in the MIBC “Moscow-City”. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2018. No. 1, pp. 18–24. (In Russian).
- Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S., Amirov R.A. Technology of construction of high-rise building frame structures from high-strength concrete of classes В60–В100. *Vestnik NITS Stroitelstvo*. 2022. No. 33 (2), pp. 106–121. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121)
- Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in the construction of high-rise buildings. *Vysotnye zdaniya*. 2007. No. 5, pp. 94–101. (In Russian).

5. Пригоженко О.В., Ярмаковский В.Н., Андрианов Л.А. Высокопрочный керамзитобетон из высокоподвижных смесей. *Научные труды II Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону*. Москва. 2005. Т. 4. С. 128–134.
6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. М.: Парадиз, 2010. 258 с.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона // *Бетон и железобетон*. 1992. № 7. С. 4–7.
8. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Влияние состава органоминеральных модификаторов бетона серии «МБ» на их эффективность // *Бетон и железобетон*. 2001. № 5. С. 11–15.
9. Kapriellov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18 (1), 24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 58–63
11. Шейнфельд А.В., Каприелов С.С., Чилин И.А. Влияние температуры на параметры структуры и свойства цементных систем с органоминеральными модификаторами // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 1. С. 58–63.
12. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 4–10.
13. Wilson H. S., Malhotra V. M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988. Vol. 10. No. 2, pp. 79–90.
14. Juan-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafis Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete // *Materials and Design*. 2022. 216. 110553.
15. Karamloo Mohammad., Mazloom Moosa., Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. 123, pp. 508–515.
16. Jae-II Sim, Keun-Hyeok Yang, Heung-Yeoul Kim, Byong-Jeong Choi. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. No. 38, pp. 854–864.
17. Gui H.Z., Tommy Yio Lo, Shazim Ali Memon, Weiting Xu. Effect of lightweight aggregates on mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2012. 35, pp. 149–158.
5. Prigozhenko O.V., Yarmakovskiy V.N., Andrianov L.A. High-strength expanded clay concrete from highly mobile mixtures. *Scientific works of the II All-Russian (International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow. 2005. Vol. 4, pp. 128–134. (In Russian).
6. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S. Novye modifitsirovannye betony [New Modified Concretes]. Moscow: Paradise. 2010. 258 p.
7. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Krivoborodov Yu.R. Influence of the structure of cement stone with the addition of microsilica and superplasticizer on the properties of concrete. *Beton i gelezobeton*. No. 7, 1992, pp. 4–7. (In Russian).
8. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V. Influence of the composition of organomineral concrete modifiers of the “MB” series on their effectiveness. *Beton i gelezobeton*. 2001. No. 5, pp. 11–15. (In Russian).
9. Kapriellov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18 (1), pp. 24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
10. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A. On the selection of compositions of high-quality concretes with organo-mineral modifiers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 58–63. (In Russian).
11. Sheynfeld A.V., Kapriellov S.S., Chilin I.A. Influence of temperature on the parameters of the structure and properties of cement systems with organomineral modifiers. *Gradostroitelstvo i arhitektura*. 2017. Vol. 7. No. 1, pp. 58–63. (In Russian).
12. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for the production of high-strength concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 4–10. (In Russian).
13. Wilson H. S., Malhotra V. M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988. Vol. 10. No. 2, pp. 79–90.
14. Juan-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafis Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of light-weight ultra-high-performance concrete. *Materials and Design*. 2022. 216. 110553.
15. Karamloo Mohammad., Mazloom Moosa., Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. 123, pp. 508–515.
16. Jae-II Sim, Keun-Hyeok Yang, Heung-Yeoul Kim, Byong-Jeong Choi. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 38, pp. 854–864.
17. Gui H.Z., Tommy Yio Lo, Shazim Ali Memon, Weiting Xu. Effect of lightweight aggregates on mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. 35, pp. 149–158.

УДК 691.421.24: 543.6

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-51-59>

Р.Р. САХИБГАРЕЕВ, д-р техн. наук, профессор (stextex@mail.ru),
Л.Н. ЛОМАКИНА, канд. техн. наук, доцент (lomakinaln@mail.ru),
Ром.Р. САХИБГАРЕЕВ, канд. техн. наук, доцент (r_sah@mail.ru),
Д.А. СИНИЦИН, канд. техн. наук, доцент (d4013438@yandex.ru),
А.А. ИБРАЕВ, аспирант (proazi@mail.ru)

Уфимский государственный нефтяной технический университет (450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)

Исследование процессов твердения тяжелого бетона в условиях попеременного замораживания и оттаивания при зимнем бетонировании

Применение монолитного бетона является одним из самых распространенных и востребованных для массового капитального строительства. Технология производства бетона и бетонных работ достаточно изучена, однако нередко возникают проблемы с недобором прочности бетона готовых конструкций, укладка бетона в которых проводится в условиях отрицательной температуры. Задача выявления причин недобора прочности и поиска решений для устранения данной проблемы в настоящее время для строительных объектов Российской Федерации является очень актуальной. В работе рассмотрены процессы деструкции цементных бетонов при попеременном замораживании и оттаивании. Проанализировано влияние различных структурно-технологических факторов на разных стадиях – приготовление, укладка бетонной смеси, твердение монолитных бетонных и железобетонных конструкций – на формирование их прочностных и эксплуатационных свойств. Приводятся результаты проведенного рентгенофазового анализа образцов проб, отобранных из нескольких монолитных железобетонных конструкций с различными модификаторами и противоморозными добавками с разных строительных объектов, в том числе из замороженных конструкций с недобором прочности. Проведенные исследования показали существенное отличие в количественном и качественном содержании продуктов гидратации и структурообразования цементного камня. Проанализированы результаты рентгенофазового анализа по содержанию отдельных фаз и оценено их влияние на процессы структурообразования. Полученные данные и их анализ расширяют область познаний в технологии зимнего бетонирования, могут быть использованы при оценке технического состояния дефектных железобетонных конструкций и возможности их восстановления и самозалечивания.

Ключевые слова: попеременное замораживание и оттаивание, монолитный бетон, гидратация цемента, деструкция, рентгенофазовый анализ, многограновая пористость, самозалечивание цементных систем, прочность, зимнее бетонирование, твердение бетона.

Для цитирования: Сахибгареев Р.Р., Ломакина Л.Н., Сахибгареев Ром.Р., Синицин Д.А., Ибраев А.А. Исследование процессов твердения тяжелого бетона в условиях попеременного замораживания и оттаивания при зимнем бетонировании // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-51-59>

R.R. SAKHIBGAREEV, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, L.N. LOMAKINA, Candidate of Sciences (Engineering), Associate professor, Rom.R. SAKHIBGIREEV, Candidate of Sciences (Engineering), Associate professor, D.A. SINITSIN, Candidate of Sciences (Engineering), Associate professor, A.A. IBRAEV, Postgraduate student
Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov Street, Ufa, 450062, Republic of Bashkortostan, Russian Federation)

Investigation of Heavy Concrete Hardening Processes under Condition of Alternate Freezing and Thawing During Winter Concreting

The use of monolithic concrete is one of the most common and in demand for mass capital construction. The technology for the production of concrete and concrete work has been sufficiently studied, however, there are often problems with a lack of strength of concrete in finished structures, the laying of concrete in which is carried out in conditions of negative temperatures. The task of identifying the reasons for the lack of strength and finding solutions to eliminate this problem is currently very relevant for construction projects in the Russian Federation. The article considers the processes of destruction of cement concretes during alternate freezing and thawing. The influence of various structural and technological factors at different stages is analyzed: preparation, laying of the concrete mixture, hardening of monolithic concrete and reinforced concrete structures on the formation of their strength and operational properties. The results of the X-ray phase analysis of samples taken from several monolithic reinforced concrete structures with various modifiers and antifreeze additives from various construction sites, including from frozen structures with a lack of strength, are presented. The conducted studies showed a significant difference in the quantitative and qualitative content of the products of hydration and structure formation of cement stone. The results of X-ray diffraction analysis on the content of individual phases are analyzed and their influence on the processes of structure formation is assessed. The data obtained and their analysis expand the field of knowledge in the technology of winter concreting, can be used in assessing the technical condition of defective reinforced concrete structures and the possibility of their restoration and self-healing of cement concrete.

Keywords: alternate freezing and thawing, monolithic concrete, cement hydration, destruction, X-ray phase analysis, multi-rank porosity, self-healing of cement systems, strength, winter concreting, concrete hardening.

For citation: Sakhibgariev R.R., Lomakina L.N., Sakhibgireev Rom.R., Sinitsin D.A., Ibraev A.A. Investigation of heavy concrete hardening processes under condition of alternate freezing and thawing during winter concreting. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 51–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-51-59>

Одним из факторов, оказывающих негативное влияние на прочность и долговечность бетона при монолитном строительстве в климатических условиях Республики Башкортостан, является его попеременное замораживание и оттаивание, особенно в период ранней весны и поздней осени. Морозная деструкция бетона в составе конструкции отличается от лабораторных имитаций замораживания [1, 2]. К основным причинам разрушения структуры бетона в реальных условиях при попеременном замораживании-оттаивании можно отнести следующие:

- миграция влаги в различных участках структуры бетона из-за перепада температуры, в результате чего в бетоне происходит изменение его влажностного состояния [1, 3]. При недопущении образования криофазы (путем введения, например, добавок) деструкция бетона развивается в системе непрерывного изменения соотношения фаз различных агрегатных состояний: твердая, жидкая, газовая. При образовании льда в бетоне возникает дополнительно четвертая фаза – криофаза, усиливающая деструкцию бетона, – криодеструкция. Такое попеременное замораживание-оттаивание особенно разрушительно для конструкций из свежесушеного бетона, когда он еще не достиг необходимой прочности [4]. После оттаивания бетон продолжает твердеть, но структурные нарушения необратимы, что в дальнейшем сказывается на его прочностных и эксплуатационных характеристиках [3, 5];

- гидростатическое давление влаги в тупиковых порах [3];

- наличие глинистых и пылевидных частиц, которые ухудшают сцепление цементного камня с заполнителями [3];

- объемная деформация компонентов структуры бетона, особенно бетона на плотных заполнителях. При замораживании влаги продукты гидратации цементного камня претерпевают деформации расширения, особенно в зонах расположения крупных капиллярных пор, являющихся концентраторами напряжений за счет образующегося льда, а непрореагировавшие зерна цемента, зерна заполнителей и сама арматура подвергаются температурным деформациям сокращения [3].

Таким образом, происходит послойная термодеструкция, термовлажностная деструкция бетона, а также деструкция бетона от сегрегативного льдообразования [1].

Способность бетона противостоять попеременному замораживанию и оттаиванию обеспечивается главным образом за счет создания в его структуре оптимального количества так называемых резервных пор, в которые при фазовом переходе воды в лед за счет гидростатического давления перемещается часть воды, что снижает растягивающие напряжения [3]. Для этой цели в бетонную смесь вводят воздухововлекающие добавки. Помимо интегральной и дифференциальной пористости, а также степени замкнутости пор и водоцементного отношения, на морозостой-

кость бетона оказывает влияние качество применяемых исходных компонентов. Так называемые комплексные добавки с воздухововлекающим и пластифицирующим эффектом позволяют образовать в структуре бетона тонкодисперсные условно-замкнутые поры, которые являются менее проницаемыми для воды. В современном строительстве при проектировании составов бетона применяют суперпластификаторы первого или второго поколений [3]. Добавки первого поколения применяются давно – это сульфомеламин- и сульфонафталинформальдегидные суперпластификаторы. Передозировка таких добавок ведет к снижению скорости гидратации цемента, а значит, к снижению прочности бетона в ранние сроки твердения. Поликарбоксилатные суперпластификаторы (второго поколения) активно поглощаются монтмориллонитами и каолинитами, что приводит к снижению эффективности суперпластификаторов [6].

Развитие процессов деструкции цементных бетонов при попеременном замораживании-оттаивании происходит преимущественно по трем направлениям:

- изменение морфологии кристаллогидратов цементного камня с образованием слабых продуктов гидратации, в том числе в результате их перекристаллизации;

- развитие внутренних напряжений в структуре цементного камня из-за давления льда в порах и изменения (увеличения) объема твердой фазы образующихся кристаллогидратов;

- ослабление сцепления и адгезии цементного камня с заполнителем на макроуровне.

На основе проведенных комплексных исследований несколькими методами, по мнению авторов [7], разрушение цемента вследствие замерзания и оттаивания происходит по двум причинам. По физическим причинам – это чередующееся изменение объема порового пространства из-за замерзания и оттаивания; химические изменения – изменение фазового состава кристаллических гидратов затвердевшего цемента.

В ходе реакции превращения моносulfата в этрингит и обратно из-за попеременного замораживания и оттаивания объем гидратных фаз периодически то увеличивается, то уменьшается, эти процессы вызывают некоторые внутренние напряжения в структуре цементного камня. Возникает градиент внутренних напряжений, приводящий к расшатыванию и постепенному разрушению структуры [7, 8]. Снижение прочностных и деформативных характеристик замороженного бетона существенно зависит от влажности бетона по отношению к предельному значению [9, 10].

Наличие в заполнителе глинистых и пылевидных частиц снижает сцепление их с цементным камнем, а также повышает водопотребность смеси. Особенно вредными являются пылевато-глинистые частицы, так как они способствуют формированию коагуляционной структуры и увеличению числа дефектов в ней [11].

Важными показателями, определяющими структуру и технологические свойства бетонов, являются удобоукладываемость бетонных смесей и их способность не расслаиваться, определяемая интенсивностью седиментационных процессов, которые, в свою очередь, обусловлены различием в средних плотностях компонентов бетона. При осаждении заполнителей и частиц цемента у поверхностей заполнителей образуется сеть сообщающихся открытых капиллярных ходов размерами 50–100 мкм и более. Другая часть воды скапливается под нижними поверхностями заполнителей, с образованием прослоек, которые ослабляют контакт заполнителей с цементным камнем. Седиментационное расслаивание тем меньше, чем больше тонкость помола цемента и меньше количество воды затворения [11].

Для повышения морозостойкости бетона авторы [3] рекомендуют применять цементы с ограниченным содержанием алюминатов (не более 5%), ввиду того, что образующиеся гидросульфоалюминаты кальция имеют повышенное содержание химически связанной воды и воды граничного слоя, которая при замораживании переходит в лед. Среди гидросиликатов более морозостойкими многие считают высокоосновные, поэтому рекомендуют применять цементы с повышенным содержанием C_3S – 60% и более. Однако автор [12] считает, что такие цементы показывают высокие значения прочности лишь в начальный и промежуточный периоды набора прочности бетона, но к 28 сут твердения не обеспечивают получения требуемой прочности.

При гидратации цемента скорость растворения мономинералов портландцементного клинкера различна. Установлено, что скорости процессов растворения мономинералов в среднем соотносятся в процессе убывания скорости следующим образом: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , CSA [13].

При этом приведенные экспериментальные данные по динамике выделения CaO , Al_2O_3 при растворении мономинералов в сильно разбавленных суспензиях показывают существенные различия их содержания на разных сроках растворения. Наиболее высокая степень и количество выделяющихся CaO и SiO_2 наблюдается у C_3S , который наряду с C_3A вносит основной структурообразующий вклад на ранних стадиях твердения цементных систем.

На создание и обеспечение условий для достижения требуемого уровня прочности и эксплуатационной надежности цементных бетонов влияют структурные и технологические факторы. Структурные факторы – создание оптимальной многограновой пористости цементного камня с организацией микро- и макрокапиллярной пористости. С точки зрения негативного влияния расширяющего внутривещного давления при попеременном замораживании и оттаивании на стенки пор цементного камня следует выделять микрокапиллярную пористость в диапазоне 50–200 нм (5–20 мкм), т. е. поры, не заполненные продуктами гидратации. Такие поры прак-

тически всегда заполнены водой или соевым раствором [14]. Как показано в работе [5], при оценке влияния распределения пор в этом диапазоне на формирующуюся прочность цементного камня и развитие дефектности цементной матрицы в процессе твердения существенно влияет изменение концентрации напряжений на границах этих пор, которое варьируется в широком диапазоне. Кроме того, на развитие структурных напряжений в цементном камне определенное влияние оказывает увеличение объема гидратирующих фаз кристаллогидратов в процессе кристаллизации и перекристаллизации, особенно на ранних стадиях твердения, до достижения проектной прочности. Расчетами показано увеличение объема отдельных фаз [15]. При реакции гидратации трехкальциевого силиката коэффициенты увеличения объема твердой фазы отдельных кристаллогидратов варьируются в диапазоне 1,45–1,77. Рассчитано количество выделяющейся гидроокиси кальция от массы продуктов гидратации. При этом значительный объем гидроокиси кальция также выделяется в процессе перекристаллизации гидросиликатов кальция. Кристаллы портландита являются наиболее слабой фазой в кристаллогидратном сростке цементного камня. Эти процессы способствуют увеличению объема твердой фазы преимущественно в промежуточных порах (интервал пор по диаметру 20–50 нм) и в микрокапиллярных порах. С одной стороны, такие процессы способствуют упрочнению структуры, с другой – разупрочняют структуру цементного камня по мере исчерпания резервов порового пространства и потери клинкерного фонда. Резерв клинкерного фонда в виде негидратировавших частиц цемента необходим для восстановления и самозалечивания локальных повреждений в структуре цементного камня, в результате перекристаллизации и других негативных воздействий, в том числе попеременного замораживания и оттаивания. На расходование и резерв клинкерного фонда в процессе твердения влияют расход и дисперсность цемента, распределение частиц цемента по размерам, минералогический состав вяжущего и водоцементное отношение [16].

Структурирование цементной матрицы по принципу многограновой пористости позволяет оценить вклад отдельных видов пор в формирование прочностных и эксплуатационных свойств цементных бетонов. Гелевые поры с интервалом по диаметру до 20 нм образуются между гидросиликатами кальция и служат в основном для доставки молекул воды и солевого раствора к гидратирующим фазам [17]. Матрицы цементной структуры с гелевой и промежуточной пористостью не до конца используют свой прочностной потенциал в предельной стадии. Прочность цементной системы в основном зависит от капиллярной пористости. Формирование оптимальной структуры микрокапиллярной пористости, снижение числа пор и выравнивание их по размерам являются эффективным путем снижения общей по-

риности для повышения прочности цементных композитов и бетонов [17].

Технологические факторы для создания и обеспечения требуемого уровня прочностных и эксплуатационных показателей бетона железобетонных конструкций следует учитывать, контролировать и соблюдать на всех стадиях: подготовка материалов, приготовление бетонной смеси, укладка бетонной смеси, уход за твердением и эксплуатация.

Приготовление бетонной смеси на бетонном заводе производится в определенной последовательности по загрузке материалов, подаче воды с целью увлажнения поверхности заполнителей, сокращению содержания воды для достижения требуемой подвижности и прочности. При применении бетона с воздухововлекающими добавками более длительное перемешивание уменьшает содержание воздуха, равно как и задержка укладки бетонной смеси без длительного перемешивания. На формирование структуры и прочности бетона также влияют определенным образом скорость, время и период перемешивания [18]. Начальная прочность бетона играет очень важную роль при зимнем бетонировании. Минералы, продукты гидратации цемента имеют разную скорость образования и разную прочность. Слабые минералы образуются в самом начале твердения и имеют низкую прочность. Слабые минералы цементного экрана препятствуют образованию более прочных минералов цемента. Технологическим методом разрушения слабых связей цементных минералов является повторное вибрирование бетонной смеси. Повторная вибрация разрушит эти новые образования цемента с возможностью образования более прочных минералов цемента [19]. Повторное перемешивание непосредственно перед укладкой бетонной смеси при зимнем бетонировании с определенными режимами и продолжительностью положительно влияет на процессы набора прочности бетона [20]. Такие технологические приемы позволяют интенсифицировать процесс перехода твердеющей цементной системы из конденсационного состояния в кристаллизационное [21].

Поводом для изучения процессов твердения бетона в условиях попеременного замораживания и оттаивания послужили неоднократные случаи возникновения фактов промораживания бетонных конструкций и недобора прочности бетона на строительных площадках Республики Башкортостан, а также необходимость продолжения исследования процессов твердения бетона в условиях зимнего бетонирования [22]. Для исследования причин недобора прочности бетона монолитных конструкций были исследованы пробы бетонных образцов, сколотых с конструкций плит перекрытий и колонн с трех различных объектов: № 13 – контрольная проба бетона, набравшего проектную прочность в зимний период, когда оттепель не наблюдалась; № 1–12 и 14 – пробы бетона, не набравшего проектной прочности.

Бетонная смесь для этих объектов изготавливалась и поставлялась одним растворобетонным узлом в феврале–марте. В процессе бетонирования, по данным исполнительной документации, использовался весь комплекс технологических мероприятий, включая электропрогрев железобетонных конструкций. Для производства бетона использовался цемент ЦЕМ I 52,5Н, заполнитель – песчано-гравийная смесь с содержанием гравия 42% и щебень (гравий). В состав бетонной смеси вводились разные добавки. Комплексная противоморозная добавка № 1 на основе смеси пластифицирующих и противоморозных компонентов, которая обеспечивает бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до -25°C. Согласно паспортным данным добавка представляет собой смесь поверхностно-активных натриевых солей метиленабисульфокислоты и противоморозного компонента на основе органических многоатомных спиртов и солей неорганических кислот. В образце № 1 согласно паспорту содержалась только добавка № 2. В данной пробе также произошел недобор прочности. Добавка № 2 представляет собой полифункциональный модификатор бетона, относящийся к классу сильнопластифицирующих добавок, повышающих показатели долговечности бетона – морозостойкость, водонепроницаемость и коррозионную стойкость. Представляет собой смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот различной молекулярной массы с добавлением воздухововлекающего и гидрофобизирующего комплексов.

Добавки вводились в количестве 1,1–1,2% от массы цемента. Проектные классы бетона по прочности при сжатии В25–В30. Бетонные смеси выпускались и укладывались в марте, когда температура наружного воздуха колебалась в дневное время от минус 10 до 0°C, в ночное время – от минус 15 до минус 10°C. Все монолитные конструкции после укладки бетона подвергались прогреву с использованием греющих проводов.

На заводе – изготовителе бетонной смеси были отобраны пробы заполнителя. Проба песчано-гравийной смеси (ПГС) по результатам испытаний содержала 2,6% пылевидных, глинистых примесей, песок из ПГС содержал 4% илистых и глинистых частиц при допустимой норме 2%. Проба ПГС, поступившая в лабораторию позднее, содержала 2,8% пылевидных, глинистых примесей, песок из ПГС содержал 3,5% илистых и глинистых частиц при допустимой норме 5% в природной песчано-гравийной смеси по ГОСТ 23735–2014 и 2% в песке по ГОСТ 8736–2014.

Рекомендуется использовать заполнитель, соответствующий требованиям нормативных документов по содержанию пылевидно-глинистых частиц, так как превышение по этому показателю однозначно приводит к снижению прочности бетона.

В результате исследований установлено, что критичным периодом с точки зрения набора бетоном прочности является бетонирование в период попере-

менного замораживания и оттаивания – ранняя весна, поздняя осень. Производитель бетона в этот период вводит в бетон добавки с противоморозным компонентом, но в дневное время суток бетон находится в условиях потепления.

В паспорте ко всем противоморозным добавкам указано, что их следует применять при минимальной суточной температуре ниже 0°C. Бетонирование с добавкой, содержащей противоморозный компонент, в данный период частично велось при положительной температуре, при которой присутствие этого компонента как антифриза роли уже не играет, а вот замедляющий эффект пластификаторов, возможно, оказался сильнее, что могло явиться причиной снижения степени гидратации цемента. Противоморозную добавку № 1 при твердении бетона рекомендуется применять только при отрицательной температуре и в оптимальных дозировках, в соответствии с рекомендациями производителя добавки.

Прежде чем принять решение о демонтаже конструкции, необходимо оценить необходимость этого мероприятия. При температуре, близкой к 0°C и ниже, набор прочности бетона после выключения прогрева практически прекращается. Динамику набора прочности можно оценить после установления устойчивой положительной температуры воздуха или с организацией тепляков вокруг не набравшей прочность конструкции.

После отключения электропрогрева в указанный период года при температуре наружного воздуха, близкой к 0°, набор прочности бетона резко замедляется и дальнейший набор происходит только после установления устойчивой положительной температуры наружного воздуха. Низкая прочность отдельных конструкций при распалубке после отключения электропрогрева не может являться достоверным свидетельством того, что бетон этих конструкций в дальнейшем не наберет прочность. При определении прочности ударно-импульсным методом влажность бетона могла быть повышена (мокрая поверхность), что значительно занижает результаты по значениям прочности. Для отдельных участков конструкций или конструкций целиком эффективность электропрогрева могла быть недостаточной.

Для более достоверного анализа и определения прочности бетона в конструкциях необходимо использовать параллельные методы (кроме применяемого ударно-импульсного): отрыв со скалыванием; скол ребра; испытание образцов, отобранных из конструкций. В холодный период года испытание образцов, отобранных из конструкций, в лабораторных условиях, подготовленных специальным образом, позволяет оценить потенциальную динамику набора прочности бетона.

Предоставленные данные по электропрогреву конструкций на объекте № 2 свидетельствуют, что указанные конструкции прогревались при достаточно высокой температуре (до 58°C). Температура замерена на определенных участках. На участках, где

не измерялось значение температуры, этот показатель мог быть выше, чем у прогреваемых конструкций. При этом скорость подъема температуры составляла до 4°C/ч. На отдельных участках конструкций высокая температура прогрева и скорость набора температуры могли оказать отрицательное влияние на набор проектной прочности.

Необходимо вести полный входной контроль качества используемых материалов для производства бетона. Контроль качества используемого заполнителя необходимо тщательно проводить в период наиболее вероятного недобора прочности бетона (весенний период). Данный период характерен наличием более влажного заполнителя, а значит, и глинистых частиц в более влажном и активном состоянии, способных покрыть собой частицы цемента и не давать им гидратировать.

Одним из способов снижения вероятности возникновения недобора прочности бетона в конструкциях и достижения проектной прочности является использование бетона с большей по сравнению с проектной прочностью бетона. Если недоборы прочности возникают, как правило, для бетона, изготовленного и уложенного в один и тот же календарный промежуток года, то решением проблемы может являться заказ бетона в этот период класса выше проектного для бетонирования ответственных конструкций, усиление или демонтаж которых требует значительных затрат.

Для более детального изучения каждая проба подвергалась рентгенофазовому анализу с использованием рентгеновского дифрактометра «D2 Phaser».

Результаты рентгенофазового анализа представлены в таблице.

В контрольном образце (№ 13) алюминатных, в том числе алюмоферритных, фаз меньше (2,44%), чем в дефектных (в среднем 9,36%), почти в четыре раза. Алюминатные фазы являются наиболее активными с точки зрения гидратации в ранние сроки твердения бетона (до 14 сут), поэтому прочность цементного камня обусловлена в том числе и их наличием, хотя часть из них связывается с присутствующим в небольшом количестве гипсом в эттрингит. Снижение количества алюминатных фаз говорит о том, что процесс гидратации идет. Однако большое их содержание в дефектных составах – признак того, что происходит замедление их гидратации и взаимодействия. Возможно, при низкой положительной температуре (в дневное время суток) произошло усиление влияния добавок-замедлителей на активность алюминатных фаз как по отношению к противоморозной добавке, так и к гипсу, количество эттрингита тоже несколько снизилось (1,64% в контрольном против 1,36% в среднем в дефектных, и к взаимодействию с водой (гидратации). При этом могла нарушиться активность гидратации алюминатных фаз за счет адсорбции на их поверхностях замедлителей, что согласно [23] приводит к тому, что замедляется образование гидроалюминатов и гидроалюмоферритов

Сводные значения минералогического состава бетона, отобранного с различных конструкций
 Summary values of the mineralogical composition of concrete taken from various structures

№	Наименование минерала	Химическая формула	Содержание, %, в образцах														Среднее значение образцов № 1-12, 14	
			№ 13 контроль-ный	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 7/1	№ 7/2	№ 7/3	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12		№ 14
1	Quartz	SiO ₂	14,64	17,03	18,66	15,76	27,59	16,53	21,59	21,16	18,91	19,89	25,13	17,52	22,58	14,03	15,25	19,4
2	Portlandite	Ca(OH) ₂	9,5	5,47	8,03	7,25	5,96	7,64	7,71	7,02	7,86	7,18	4,15	5,55	4,42	6,09	2,79	6,22
3	C ₃ S monoclinic (NISHI)	Ca ₃ SiO ₅	6,47	9,67	3,41	2,41	7,73	2,28	5,56	5,32	3,48	2,28	8,31	7,64	9,25	7,74	9,4	6,03
4	C ₃ S triclinic (BELOW)	Ca ₃ SiO ₅	6,15	2,82	3,75	8,34	2,08	6,63	1,96	2,36	4,53	3,17	4,91	2,87	5,52	5,28	1,26	3,96
6	C ₂ S beta (MUMME)	Ca ₂ SiO ₄	1,15	3,82	1,87	1,35	6,23	1,06	2,93	4,28	1,33	1,59	2,19	5,46	1,46	0	1,51	2,51
7	C ₂ S gamma (MUMME)	Ca ₂ SiO ₄	1,57	1,26	0,87	1,26	0	1,23	1,28	1,25	2,93	1,06	1,66	1,41	1,76	1,03	0,56	1,25
8	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	3,73	0,5	0,7	0	0,64	2,69	0,99	0,85	0,71	0,55	0	9,99	4,42	0	0	1,57
9	Etringite	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·26H ₂ O	1,64	2,44	0	0	1,24	0	1,09	2,15	1,32	0	1,93	1,5	1,47	2,78	3,07	1,36
10	C ₄ AF	Ca ₂ (Fe _{1,014} Al _{0,986})O ₅	2,44	9,3	8,19	8,15	2,86	8,83	6,86	7,69	6,9	5,74	8,58	5,87	8,76	9,5	10,96	7,73
11	Microcline maximum	KAlSi ₃ O ₈	1,79	2,79	2,78	1,94	0,7	1,94	2,55	3	1,44	3,03	1,77	1,89	0,98	2,69	2,04	2,11
12	Brownmillerite (Si, Mg)	Ca ₂ FeAlO ₅	3,57	0	0	0	0	0	0	0	0	1,47	0	0	1,95	0	0	0,24
13	Enstatite	MgSiO ₃	6,41	2,33	8,39	7,49	3,85	2,74	2,96	6,77	5,61	6,06	1,82	5,04	1,94	8,19	5,32	4,89
14	Albite C-1	NaAlSi ₃ O ₈	0	1,02	0,51	1,82	1,6	3,38	1,53	0	0,88	1,15	0,76	0,31	0	0	1,45	1,03
15	Calcite	CaCO ₃	2,95	3,13	1,75	3,76	2,63	3,4	2,96	2,98	4,03	1,6	2,51	0,73	2,45	7,27	5,2	3,17
16	Periclase	MgO	0,4	0,83	0,32	0	0	0	0	0	0	0,48	0,15	0	0,59	0	1,21	0,26
17	Wollastonite 1T	CaSiO ₃	1,74	3,54	1,89	1,82	2,42	1,95	1,49	1,73	1,4	1,57	2,31	1,93	2,49	1,07	1,97	1,97
18	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0	0	0	1,25	0	0	1,46	0,31	0,79	0	0	0	0	0,81	0,49	0,37
19	C ₁₂ A ₇ Mayenite	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	0	1,53	1,56	1,39	1,22	1,73	2,3	2,26	1,82	1,47	1,86	1,55	0,97	1,07	2,1	1,63
20	Lime	CaO	0	0,35	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03
21	Nitrate	NaNO ₃	1,39	3,31	4,98	1,36	1,9	1,53	0,9	5,82	1,14	4,39	7,93	2,72	1,67	6,66	10,57	3,92
22	Hexahydrite	MgSO ₄ ·6H ₂ O	0,67	0	0,72	2,21	0	0,44	0	0	0	0,64	0	0	0	0	0	0,29
23	CA ₂ Grossite	CaAl ₂ O ₇	0	0	1,79	0,51	0	0,93	0,26	0,76	0,97	1,26	0	0,48	0	0	1,96	0,64
24	Muscovite 2M1	H ₂ KAl ₃ (SiO ₄) ₃	0	0	0	1,64	2,58	2,32	2,29	0	5,69	2,35	0	3,13	0	0	0	1,43
25	Gibbsite	Al(OH) ₃	2,86	5,98	1,14	0,92	1,67	1,5	3,84	3,93	3,18	3,65	2,3	2,78	2,09	1,79	1,12	2,56
26	C ₂ SН alpha	Ca ₂ SiO ₄ ·H ₂ O	3,99	1,27	2,62	4,38	3,21	4,18	3,38	3,34	1,94	2,3	1,1	2,29	3,02	1,91	2,24	2,66
27	C ₃ SН Rosenhahnite	Ca ₃ (Si ₃ O ₈)(OH) ₂	7,85	5,35	7,08	7,78	7,49	11,21	7,82	7,52	8	8,9	6,36	4,83	7,78	8,11	6,94	7,51
28	C ₆ SН gamma Dellaite	Ca ₆ (SiO ₄)(Si ₂ O ₇)(OH) ₂	6,82	8,42	8,26	5,48	11,43	6,73	6,56	4,13	4,97	9,34	7,52	6,88	3,95	2,88	7,23	6,7
29	Clinzoisite	Ca ₂ Al ₃ (Si ₂ O ₇)(SiO ₄)(OH) ₂	7,86	5,36	5,35	5,7	5	4,01	4,33	3,84	4,65	5,62	4,42	5,66	5,77	4,94	1,66	4,74
30	Tobermorite	Ca ₅ (OH) ₂ Si ₆ O ₁₆ (H ₂ O) ₄	4,39	2,49	5,24	6,02	0	5,13	5,39	1,53	5,6	3,24	2,32	1,97	4,71	6,14	3,69	3,82
	Сумма силикатов кальция	Минералы цемента	17,08	21,11	11,79	15,18	18,46	13,15	13,22	14,94	13,57	9,67	19,38	19,31	20,48	15,12	14,7	15,72

№	Наименование минерала	Химическая формула	Содержание, %, в образцах													Среднее значение образцов № 1–12, 14		
			№ 13 контрольный	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 7/1	№ 7/2	№ 7/3	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11		№ 12	№ 14
	В том числе сумма силикатов кальция C_3S	Минералы цемента	14,36	16,03	9,05	12,57	12,23	10,86	9,01	9,41	9,41	7,02	15,53	12,44	17,26	14,09	12,63	11,97
	Сумма алюмосиликатов натрия и калия	Глинистые частицы в заполнителях	1,79	3,81	3,29	3,76	2,3	5,32	4,08	3	2,32	4,18	2,53	2,2	0,98	2,69	3,49	3,14
	Сумма алюминатов и алюмоферритов кальция	Минералы цемента	2,44	10,83	9,75	9,54	4,08	10,56	9,16	9,95	8,72	7,21	10,44	7,42	9,73	10,57	13,06	9,36
	Сумма гидросиликатов	Продукты гидратации цемента	30,91	22,89	28,55	29,36	27,13	31,26	27,48	20,36	25,16	29,4	21,72	21,63	25,23	23,98	21,76	25,42

(продуктов гидратации цемента) – одних из первых продуктов твердения на ранних сроках.

Силикатов в контрольном образце несколько больше (17,08%), чем в дефектных (в среднем 15,72%). Это может означать, что при повышении температуры (дневном потеплении) в бетоне ускоряется образование гидросиликатов, что является нормальным для бетона.

Учитывая факты, изложенные в предыдущих пунктах, можно предположить, что именно алюминатные фазы в начальных стадиях твердения бетона более чувствительны к данным добавкам и условиям твердения. Подтверждением этого являются результаты исследований [24]. Указанными исследованиями установлено, что одним из направлений для получения бетонов повышенной прочности при твердении в условиях отрицательной температуры является применение алюмоферритных цементов, т. е. смешанных вяжущих на основе алитов и алюмоферритов кальция. Алюмоферриты кальция придают высокую начальную прочность цементному камню на морозе, а с возрастом твердения нарастание прочности обуславливает алитовая фаза.

Количество портландита $Ca(OH)_2$ в 1,5 раза выше в контрольном, чем в дефектных образцах. А сумма гидросиликатов кальция в контрольном образце также больше – примерно на 20%. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что именно на продуктах гидратации лигносульфонаты, имеющиеся в составе добавки № 1, адсорбируются быстрее, препятствуя росту кристаллов и замедляя процессы повышения прочности. А именно гидросиликаты являются «носителями» прочности цементного бетона.

При повышении температуры гидратация силикатов происходит быстрее; замедлители, адсорбируясь на образующихся гидросиликатах, тоже могут активизироваться, препятствуя дальнейшему росту этих кристаллов гидросиликатов, а адсорбируясь на алюминатах (алюмоферритах), более интенсивно снижают не только рост, но и даже образование гидроалюминатов (гидроалюмоферритов). Об этом могут свидетельствовать сравнительные результаты количества гидроалюминатной фазы $Ca_2Al_3(Si_2O_7)(SiO_4)(OH)O$: в контрольном образце (7,84%) ее количество выше в два раза, чем в дефектных (в среднем 4,74%).

Во всех составах (и контрольном, и в дефектных) обнаружено вещество нитратин (нитрат натрия) – противоморозный компонент комплексной добавки в бетон. К особенностям данного вещества следует отнести тот факт, что оно само по себе не ускоряет твердения смеси, а лишь не допускает кристаллизации молекул воды, т. е. является антифризом – добавкой, снижающей температуру твердения бетона. Наличие другого противоморозного компонента не представилось возможным определить ввиду того, что имеющийся дифрактометр не предусматривает определения присутствия органических соединений.

Рентгенофазовый анализ цемента показал общее содержание алитных фаз – 73,57%, белита – 1,57%, трехкальциевого алюмината – 6,19% и четырехкальциевого алюмоферрита – 3,87%. По содержанию алита цемент относится к среднеалюминатным, что позволяет использовать его при зимнем бетонировании.

Отрицательным является тот факт, что во всех пробах бетона обнаружено наличие большого количества алюмосиликатных фаз (в контрольном 1,79%, в дефектных – в 1,5–2 раза больше, в среднем 3,14%). Данные фазы являются глинистыми минералами, общее количество которых ограничено по ГОСТ 8267–93 до 2% для песка и не более 1% для щебня марки 1200 по ГОСТ 8736–2014). По результатам физико-механических испытаний представленных проб заполнителя также обнаружено в нем превышение содержания глинистых ми-

нералов — от 2,6 до 3,5%, что подтверждает результаты физико-химического анализа.

Проведенные исследования по результатам рентгенофазового анализа показали существенное качественное и количественное различие по содержанию продуктов гидратации и структурообразования в образцах бетонных конструкций, имеющих проектную

и пониженную прочность. С целью достижения необходимого уровня прочностных и эксплуатационных свойств цементных систем и обеспечения необходимого потенциала самозалечивания таких систем при твердении бетона в условиях попеременного замораживания и оттаивания исследования необходимо продолжать.

Список литературы

1. Чернышов Е.М. Морозная деструкция бетонов. Ч. 1. Механизм, критериальные условия управления // *Строительные материалы*. 2017. № 9. С. 40–46.
2. Подвальный А.М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений // *Строительные материалы*. 2004. № 6. С. 4–6.
3. Величко Е.Г. Морозостойкость бетона с оптимизированным дисперсным составом // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 81–83.
4. Klemm A.J., Klemm P. Ice formation in pores in polymer modified concrete: II. The influence of the admixtures on the water to ice transition in the cementitious composites subjected to freezing/thawing cycles. *Building and Environment: the International Journal of Building Science and its Applications*. 1997. Vol. 32 (3), pp. 199–202. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00054-6)
5. Сахибгареев Р.Р. Управление структурой при применении модифицированных бетонов // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2008. № 4 (12). С. 132–150.
6. Крамар Л.Я., Черных Т.Н., Шулдяков К.В. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность // *Строительные материалы*. 2016. № 11. С. 21–25.
7. Корчунов И.В., Перепелицына С.Е., Потапова Е.Н. Влияние отрицательных температур на фазовый состав цементной матрицы // *Успехи в химии и химической технологии*. Т. XXXIII. 2019. № 4. С. 101–103.
8. Vesa Penttala, Fahim Al-Neshawy. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Iss. 9, pp. 1407–1420. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00785-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00785-8)
9. Ярмаковский В.Н., Кадиев Д.З. Физико-химические основы стойкости бетонов к воздействию низких отрицательных температур // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 4 (90). С. 122–136.
10. Syeda Rahman, Zachary Grasley, A poromechanical model of freezing concrete to elucidate damage mechanisms associated with substandard aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55, pp. 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.10.001>

References

1. Chernyshov E.M. Frost destruction of concrete. Part 1. Mechanism, criterial conditions of control. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 9, pp. 40–46. (In Russian).
2. Podval'ny A.M. On the concept of ensuring the frost resistance of concrete in the structures of buildings and structures *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 6, pp. 4–6. (In Russian).
3. Velichko E.G. Frost resistance of concrete with optimized disperse composition *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 2, pp. 81–83. (In Russian).
4. Klemm A.J., Klemm P. Ice formation in pores in polymer modified concrete: II. The influence of the admixtures on the water to ice transition in the cementitious composites subjected to freezing/thawing cycles. *Building and Environment: the International Journal of Building Science and its Applications*. 1997. Vol. 32 (3), pp. 199–202. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00054-6) (In Russian).
5. Sakhibgarayev R.R. Structure management in the application of modified concrete. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2008. No. 4 (12), pp. 132–150. (In Russian).
6. Kramar L.Ya., Chernykh T.N., Shuldyakov K.V. Modern superplasticizers for concrete, features of their application and efficiency. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 11, pp. 21–25. (In Russian).
7. Korchunov I.V., Perepelitsyna S.E., Potapova E.N. Influence of negative temperatures on the phase composition of the cement matrix. *Uspexi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2019. Vol. XXXIII. No. 4, pp. 101–103. (In Russian).
8. Vesa Penttala, Fahim Al-Neshawy. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Iss. 9, pp. 1407–1420. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00785-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00785-8)
9. Yarmakovskiy V.N., Kadiev D.Z. Physical and chemical bases of resistance of concrete to the effects of low negative temperatures. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 4 (90), pp. 122–136. (In Russian).
10. Syeda Rahman, Zachary Grasley, A poromechanical model of freezing concrete to elucidate damage mechanisms associated with substandard aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55, pp. 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.10.001>
11. Korolev E.V. Features of the structure of cement stone and concrete. *Innovatsii i investitsii*. 2017. No. 8, pp. 150–156. (In Russian).

- pp. 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.10.001>
11. Королев Е.В. Особенности структуры цементного камня и бетона // *Инновации и инвестиции*. 2017. № 8. С. 150–156.
 12. Подмазова С.А. Обеспечение качества бетона монолитных конструкций // *Строительные материалы*. 2004. № 6. С. 8–10.
 13. Полак А.Ф., Бабков В.В., Андреева Е.П. Твердение минеральных вяжущих веществ. Уфа: Башкирское книжное изд-во, 1990. 216 с.
 14. Вербетский Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. М.: Стройиздат, 1976. 128 с.
 15. Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р., Сахибгареев Ром.Р., Чуйкин А.Е., Кабанец В.В. Роль аморфного микрокремнезема в процессах структурообразования и упрочнения бетонов // *Строительные материалы*. 2010. № 6. С. 44–46.
 16. Горчаков Г.И., Орентлихер Л.П., Савин В.И. и др; Состав, структура и свойства цементных бетонов / Под ред. Г.И. Горчакова. М.: Стройиздат, 1976. 145 с.
 17. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П.Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. 376 с.
 18. Невилль А.М., Парфенов В.Д., Якуб Т.Ю. Свойства бетона. М.: Книга по Требованию, 2021. 344 с.
 19. Brzhanov R.T., Pikus G.A., Traykova M. Methods of increasing the initial strength of winter concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 451. *International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018)*. 26–28 September 2018. DOI 10.1088/1757-899X/451/1/012083
 20. Усов Б.А. Бетонирование монолитных конструкций из литых смесей в зимних условиях // *Системные технологии*. 2016. № 21. С. 5–17.
 21. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. Киев: Наукова думка, 1984. 300 с.
 22. Агзамов Ф.А., Ломакина Л.Н., Гафурова Э.А., Бикмеева Н.Б. Исследование процессов структурообразования бетона в условиях зимнего бетонирования // *Нефтегазовое дело*. 2013. № 6. С. 384–400.
 23. Добавки в бетон: Справ. пособие / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М. Коллепарди и др.; Под ред. В.С. Рамачандрана; Пер. с англ. Т.И. Розенберг и С.А. Болдырева; Под ред. А.С. Болдырева и В.Б. Ратинова. М.: Стройиздат, 1988. 575 с.
 24. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Под ред. Л.Г. Шпыновой. Львов: Вища школа. Изд-во при Львовском университете, 1981. 160 с.
 12. Podmazova S.A. Ensuring the quality of concrete of monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 6, pp. 8–10. (In Russian).
 13. Polak A.F., Babkov V.V., Andreeva E.P. [Tverdeniye mineral'nykh vyazhushchikh veshchestv] Hardening of mineral binders. Ufa: Bashkir book publishing house. 1990. 216 p.
 14. Verbetsky G.P. Prochnost' i dolgovechnost' betona v vodnoy srede [Strength and durability of concrete in the aquatic environment]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 128 p.
 15. Babkov V.V., Sakhibgareev R.R., Sakhibgareev Rom.R., Chuikin A.E., Kabanets V.V. The role of amorphous microsilica in processes of structure formation and strengthening of concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 6, pp. 44–46. (In Russian).
 16. Gorchakov G.I., Orentlicher L.P., Savin V.I., and others. Sostav, struktura i svoystva tsementnykh betonov [Composition, structure and properties of cement concrete / Ed. by G.I. Gorchakov]. Moscow: Stroyizdat. 1976. 145 p.
 17. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitonov S.M., Komokhov P.G. Strukturoobrazovaniye i razrusheniye tsementnykh betonov. [Structure formation and destruction of cement concretes]. Ufa: Ufimsky polygraph plant. 2002. 376 p.
 18. Neville A.M., Parfenov V.D., Yakub T.Yu. Svoystva betona [Properties of concrete]. Moscow: Book on Demand, 2021. 344 p.
 19. Brzhanov R.T., Pikus G.A., Traykova M. Methods of increasing the initial strength of winter concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 451. *International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018)*. 26–28 September 2018. DOI 10.1088/1757-899X/451/1/012083
 20. Usov B.A. Concreting of monolithic structures from cast mixtures in winter conditions. *Sistemnyye tekhnologii*. 2016. No. 21, pp. 5–17. (In Russian).
 21. Grankovsky I.G. Strukturoobrazovaniye v mineral'nykh vyazhushchikh sistemakh [Structure formation in mineral binding systems]. Kyiv: Naukova Dumka. 1984. 300 p.
 22. Agzamov F.A., Lomakina L.N., Gafurova E.A., Bikmееva N.B. Investigations of the processes of structure formation in concrete conditions on winter concreting. *Neftegazovoye delo*. 2013. No. 6, pp. 384–400. (In Russian).
 23. Dobavki v beton: Sprav. posobiye [Additives in concrete: Handbook / Ramachandran V.S., Feldman R.F., Colleparди M. and others. Ed. V.S. Ramachandran; Trans. from English Rosenberg T.I. and S.A. Boldyrev; Ed. by Boldyrev A.S. and V.B. Ratinova]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 575 p.
 24. Fiziko-khimicheskiye osnovy formirovaniya struktury tsementnogo kamnya [Physical and chemical bases of cement stone structure formation / Ed. L.G. Shpynova]. Lvov: Vishcha schkola. 1981. 160 p.

Н.С. СОКОЛОВ^{1,2}, канд. техн. наук, директор (ns_sokolov@mail.ru);
С.Н. СОКОЛОВ², директор ООО «Строитель Форст»,
А.Н. СОКОЛОВ², директор по строительству (forstnpf@mail.ru)

¹ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр., 15)

² ООО НПФ «ФОРСТ» (428000, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Калинина, 109а)

Геотехническая технология воздействия радиогидравлического удара при сверхвысокочастотных процессах для устройства буринъекционных свай

Проблемы эффективности повышения несущей способности основания фундаментов всегда находятся под пристальным вниманием геотехников, проектировщиков и строителей. В связи с увеличением объемов капитального строительства на площадках, расположенных в сложных геотехнических условиях, в том числе с наличием в их основаниях инженерно-геологических элементов со слабыми физико-механическими характеристиками, эта проблема приобретает еще большую актуальность. Использование буринъекционных свай, устраиваемых с использованием нестандартных физических процессов, в большинстве случаев успешно решает многие сложные и нетипичные геотехнические проблемы. Эффект радиогидравлического удара в геотехническом строительстве известен, но почти не применяется. Требуется большая исследовательская работа по использованию его в части создания установок, а также разработки конкретных технологий с привязкой к типам грунтов.

Ключевые слова: геотехническое строительство, физические процессы, микроволновое излучение, буринъекционная свая, радиогидравлика.

Для цитирования: Соколов Н.С., Соколов С.Н., Соколов А.Н. Геотехническая технология воздействия радиогидравлического удара при сверхвысокочастотных процессах для устройства буринъекционных свай // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 60–64. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-60-64>

N.S. SOKOLOV^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering), Director (ns_sokolov@mail.ru),

S.N. SOKOLOV², Director, LLC "Stroitel Forst",

A.N. SOKOLOV², Director for construction (forstnpf@mail.ru)

¹ Chuvash State University named after I.N. Ulyanov (15, Moskovsky prospect, Cheboksary, 428015, Chuvash Republic, Russian Federation)

² LLC NPF "FORST" (109a, Kalinina Street, Cheboksary, 428000, Chuvash Republic, Russian Federation)

Geotechnical Technology of the Impact of Radio Hydraulic Shock at Ultrahigh-Frequency Processes for the Installation of Bored-Injection Piles

The problems of the effectiveness of increasing the bearing capacity of the foundations base are always under the close attention of geotechnicians, designers and builders. In connection with the increase in the volume of capital construction at sites located in difficult geotechnical conditions, including the presence of engineering-geological elements with poor physical and mechanical characteristics in their bases, this problem becomes even more relevant. The use of injection piles, arranged using non-standard physical processes, in most cases successfully solves many complex and atypical geotechnical problems. The effect of radio-hydraulic shock in geotechnical construction is known, but almost never used. A lot of research work is required to use it in terms of creating installations, as well as developing specific technologies with reference to soil types.

Keywords: geotechnical construction, physical processes, microwave radiation, bored-injection pile, radio hydraulics.

For citation: Sokolov N.S., Sokolov S.N., Sokolov A.N. Geotechnical technology of the impact of radio hydraulic shock at ultrahigh-frequency processes for the installation of bored-injection piles. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 60–64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-60-64>

Проблема увеличения несущей способности слабых оснований, особенно при наличии перемежающихся грунтов, всегда является актуальной геотехнической задачей. Решить эту проблему можно одним из двух методов. Первый способ – использование железобетонных свай как армирующих заглубленных железобетонных конструкций. На наш взгляд использование физических процессов для целей улучшения слабых оснований является наиболее перспективным направлением в современном геотехническом строительстве. Одним из возможных физических процессов можно рассматривать микроволновое излучение.

Интересным способом применения микроволнового излучения для решения задачи укрепления слабых оснований и близких к ним задач является термическое укрепление грунта. Под этим понимаются технологии устройства оснований зданий и сооружений посредством термического укрепления грунта с помощью мобильных установок сверхвысоких частот (СВЧ), нагревающих грунт до стадии плавления.

Технология включает в себя образование лидерной скважины; размещение в ней излучателя СВЧ-энергии; тепловое воздействие на окружающий буровую скважину массив грунта в два этапа в течение заданного периода времени, извлечение из скважи-

Этапы термического закрепления основания
Stages of thermal fixing of the base

Этап 1	Производят бурение лидерной скважины, диаметром 300 мм на глубину 5 м. В забой скважины устанавливают волновод с излучателем, отверстие герметизируют плитой с патрубком для подсоединения вакуум-насоса и отверстием для размещения волновода
Этап 2	Производят подсушку массива грунта через стенку скважины, нагревая грунт до температуры, равной 150°C, при минимальной мощности 15–17,25 кВт с одновременным перемешиванием источника энергии снизу вверх и удалением испаряющейся влаги вакуум-насосом
Этап 3	После подсушки волновод опускают в исходное положение (забой скважины) и при равномерном нагреве грунта до температуры 1000°C и при максимальной мощности 50 кВт производят термообработку массива грунта через стенку буровой скважины с одновременным перемещением источника энергии снизу вверх
Этап 4	После термообработки массива грунта волновод удаляют из скважины, производят герметизацию устья скважины и выдержку нагретого массива с последующей разгерметизацией и заполнением скважины инертным материалом или бетоном.

ны и заполнение ее материалом, причем на первом этапе теплового воздействия ведут нагревание грунта до температуры, равной 150°C, с наименьшей мощностью излучения 15–17,25 кВт, а на втором – при наибольшей мощности излучения 50 кВт с нагревом грунта до температуры, равной 1000°C. Во время теплового воздействия осуществляют возвратно-поступательное перемещение излучателя вдоль скважины [1–3].

Наиболее близкий к предлагаемому способу по технической сущности и достигаемому эффекту является способ термического укрепления, преимущественно в виде сваи, включающей образование лидерной скважины, размещение в ней излучателя СВЧ-энергии, тепловое воздействие на окружающий массив грунта в два этапа в течение заданного времени, извлечение излучателя из скважины и заполнение материалом. Однако в этом способе нагревание массива грунта от внешнего контура производят при частоте 500 МГц, что вызывает нагрев до 350–400°C. В этом случае происходит резкое удаление воды из пор грунта, что может привести к нарушению целостности скважины. Кроме того, в этом способе излучатель СВЧ-энергии в процессе воздействия на грунт через стенки скважины полем СВЧ-энергии остается неподвижным, что значительно уменьшает равномерность и скорость нагрева массива (см. таблицу).

Использование данного способа термического укрепления грунта обеспечивает по сравнению с существующими способом высокое качество за счет равномерной термообработки массива грунта, возможность дистанционного управления термической обработкой и автоматизации этого процесса. Предлагаемый способ сокращает длительность процесса и снижает расход энергии.

В [1] предложен способ изготовления свайных оснований с помощью термического укрепления грунта. Термическое укрепление грунта основано на его нагреве, вызывающем необратимые изменения вещественного состава и физико-механических свойств. В 1920-х гг. появились машины и оборудование для термообработки грунтов на строительной площадке. Твердое углеводородное топливо, исполь-

зуемое ранее для обжига грунтовых смесей и изделий, было дополнено жидким и газообразным, сжигаемым в специальных горелках. Плотность теплового потока удалось повысить до $5 \cdot 10^4$ Вт/м². Физико-механические свойства термогрунтов после четвертой стадии термического воздействия в меньшей степени зависят от химико-минералогического состава исходного грунта. В первую очередь эти характеристики определяются режимом и условиями охлаждения материала на шестой стадии. Быстрое охлаждение недопустимо, так как ведет к возрастанию термических напряжений, вызывающих микро- и макродефекты структуры плавленого грунта. Отличительной особенностью плавленых грунтов является не только высокая прочность, но и долговечность, оцениваемая по водо- и морозостойкости и стойкости к воздействию агрессивных сред.

Основное преимущество плазменного нагрева – высокая плотность теплового потока, что вызывает быстрое оплавление обрабатываемой поверхности со снижением фильтрации газов в грунт. Общая толщина этих слоев примерно соответствует первоначальному диаметру скважины. Для повышения несущей способности сваи устраиваются уширения. Они образуются за счет задержки плазмотрона на заданной глубине на 4–7 мин с прекращением подачи грунта из дозатора. Затем уширение заполняется расплавом.

Производительность процесса определяется энергетической мощностью установки и влажностью исходного грунта. Результаты экспериментально-теоретических исследований, выполненных с использованием лабораторных стендов, проверены на опытно-производственном строительстве [1]. Для этого была сконструирована и изготовлена опытная установка для глубинной термообработки грунтов на строительной площадке. Эта установка оснащена генератором низкотемпературной плазмы оригинальной конструкции длиной 3,5 м (увеличение длины не вызывает затруднений). За счет поперечного взаимодействия многодугового разряда с плазмообразующим газом формируется «размытый» плазменный факел диаметром 150–170 мм со среднемассовой температурой $(5–6) \cdot 10^3$ К. В качестве плазмообразующего газа используется воздух. Охлаждение

электродов производится за счет циркуляции воды в замкнутой системе с резервной емкостью. Энергетическая мощность генератора плавно изменяется от 60 до 160 кВт. Все системы автономного питания размещены на грузовом прицепе в мобильной плазмобразующей станции.

Свайное поле было устроено в 1997 г. на опытной строительной площадке, грунтовый массив которой сложен суглинками тяжелыми пылеватыми полутвердой консистенции с коэффициентом уплотнения 0,9–0,92, модулем деформации грунта 5000–6000 кПа, коэффициентом сцепления 50 кПа и углом внутреннего трения 24°. Были изготовлены буронабивные и грунтоплавленные сваи длиной 1,5–2 м. Бетонные буронабивные сваи выполнены по стандартной геотехнической технологии с целью сопоставления их несущей способности с грунтоплавленными сваями. Для изготовления таких свай использовался грунт, выбуренный из массива при проходке лидерных скважин. Статические испытания свай на вертикальную вдавливающую нагрузку проведены специалистами АО «Омский трест инженерно-строительных изысканий» (г. Омск) в соответствии с требованиями ГОСТ 5686–2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями». Вдавливание свай вертикальными статическими нагрузками осуществлялось гидравлическими домкратами. Вертикальные деформации измерялись индикаторами часового типа ИЧ-50 с ценой деления 0,01 мм. Нагружение каждой сваи проводилось до достижения предельной осадки согласно с требованиями ГОСТ 5686–2012 [1, 2].

Все грунтоплавленные сваи показали повышенную несущую способность по сравнению с буронабивными сваями тех же геометрических размеров, превосходя в два-три раза [1].

После проведения полевых статических испытаний было осуществлено шурфование с замером всех фактических параметров каждой сваи и грунтового массива вокруг них. Результаты замеров показали, что высокая несущая способность грунтоплавленных свай объясняется уширениями и наличием слоев грунта с различным уровнем термической модификации, расположенных по периферии от тела свай из остывшего силикатного расплава.

Диаметр уширения достигал 580 мм, а толщина слоев модифицированного грунта – 200 мм и более. Влажность этих слоев оставалась на уровне 2–4%, несмотря на то что с момента изготовления свай до их обследования прошло пять месяцев, а влажность грунта в окружающем массиве составляла 20–24%.

Экономическая эффективность предлагаемой геотехнической технологии по изготовлению грунтоплавленных свай обоснована высокими значениями прочности материала поперечного сечения; несущей способностью и долговечностью свайного основания; пригодностью для плазменной термообработки практически всех видов местных грунтов или минеральных отходов промышленности; отказом от дорогостоящих привозных материалов и от строительства

и содержания базы для изготовления этих материалов и изделий; возможностью круглосуточного и круглогодичного производства работ при сравнительно малой величине зимнего удорожания; относительно высоким КПД получения тепловой энергии и всего технологического процесса; экологической чистотой технологического процесса; мобильностью и автономностью установки для плазменной термообработки грунтов [1].

Общая стоимость строительства свайных оснований из плавленых грунтов складывается из затрат: на подготовительные работы (бурение скважин, подготовка грунта); на приобретение топлива для передвижной электростанции; на приобретение электродов для плазмотрона; на оплату труда обслуживающего персонала; на отчисления для ремонта и восстановления оборудования.

Предварительные конструкторские проработки показали, что вся плазменная установка может быть размещена на платформе грузового автомобиля грузоподъемностью 120 кН. Генератор для энергоснабжения установки может иметь привод от двигателя этого автомобиля. Погружной плазмотрон монтируется на выдвинутой стреле с системой гидравлики.

Изготовление оснований из грунтоплавленных свай рекомендуется в первую очередь при строительстве зданий малой этажности, при реконструкции зданий, высокой агрессивности грунтовых вод, большой рассредоточенности малых объектов, отсутствии развитой базы строительной индустрии и т.д. Экономическая эффективность предлагаемых решений зависит от конкретных условий строительства. Техничко-экономические расчеты показывают, что изготовление оснований из грунтоплавленных свай может быть в 1,5–3 раза дешевле, чем применение традиционных технологий, материалов и конструкций [1].

В работе [3], выполненной специалистами Уральского филиала Московского государственного автомобильно-дорожного института в сотрудничестве с инженерами Томского государственного архитектурно-строительного университета, предлагается вместо традиционных способов нагрева грунтов, укрепленных силикатами, для интенсификации процесса их твердения использовать нагрев с помощью энергии СВЧ, что позволяет добиться более интенсивного нарастания температуры при большей равномерности нагрева.

В работе [4] рассмотрены мобильные опытно-промышленные СВЧ-установки. В этой работе представлена мобильная СВЧ-установка для изготовления термообработанных грунтовых блоков. Установка состоит из двух модулей (формовочного устройства и обжиговой печи), смонтированных на передвижных платформах, и оснащена энергетическим оборудованием, устройствами перемещения, узлом защиты от излучения, системой автоматизированного управления. Сформованный грунтовый блок поступает по транспортеру на роулинг обжиго-

вой печи, представляющей собой стальную трубу наружным диаметром 1420 мм с теплоизоляцией. В печи происходит сушка и нагрев блока до температуры 950–1100°C, затем он поступает в приемную камеру. Мобильная СВЧ-установка для термообработки грунтовых массивов может размещаться внутри быстровозводимого здания модульного типа.

Мобильная СВЧ-установка для термообработки грунтовых массивов на месте их залегания состоит из энергетического узла, механизма перемещения и базового большегрузного автомобиля с металлическим кузовом. Энергетический узел представляет собой источник СВЧ-излучения, оснащенный волноводами прямоугольного и круглого сечений, шелевыми и рупорными излучателями, а также механизмом вращения, позволяющим вращать секции волновода вокруг своей оси [5–8].

Помимо ранее рассмотренных способов применения микроволнового излучения, можно рассмотреть в качестве перспективного использование радиогидравлического эффекта.

В работе [3] описан эффект формирования ударных волн в несжимаемых жидкостях при поглощении мощных СВЧ-импульсов. В 1957–1959 гг. в СССР начались исследования по созданию управляемых термоядерных реакторов. Один из рассматриваемых тогда методов удержания и разогрева активной области реактора до температур, необходимых для начала термоядерной реакции, заключался в ее облучении несколькими сверхмощными СВЧ-источниками. Для реализации такого проекта был необходим генератор СВЧ-излучения, способный в одном импульсе излучать энергию порядка 10 кДж.

Подобный генератор мог строиться на клистронах с длительностью импульса 1–2,5 мкс, в то время как у существовавших тогда генераторов длительность импульса составляла 10–2 мкс.

Для решения данной геотехнической задачи создавались клистроны «Аметист» с выходной мощностью 5 МВт и длительностью импульса 2 мкс с периодом повторения 10 с.

В ходе производства геотехнических работ были получены экспериментальные подтверждения ново-

го понятия – радиогидравлического эффекта. Он заключался в том, что при облучении жидкости радиоимпульсами большой энергии в ней возникают мощные гидравлические волны.

Физика предполагаемого явления представлялась достаточно очевидной. Известно, что при кратковременном выделении значительной энергии в жидкости, например в воде, благодаря ее практической несжимаемости возникает гидродинамический удар.

Был поставлен и прямой эксперимент, демонстрирующий радиогидравлический эффект. В качестве источника СВЧ-энергии использовался СВЧ-генератор мезонной фабрики на клистроне «Соболь». В эксперименте нагрузка представляла собой стеклянную емкость с водой, помещенную в волноводе. Один из концов этой емкости прикрывался латунной мембраной, вплотную к которой прислонялся стальной шарик. При подаче СВЧ-импульсов (1–1,5 МВт; 120 мкс) ударная гидравлическая волна воздействовала на мембрану, в результате чего она перемещалась на 0,01 мм и толкала шарик. По его перемещению определялось давление на мембрану, составившее порядка 30 атм [5–8].

Выводы

Геотехническое строительство обладает громадным арсеналом технологий и оборудования к ним. При этом использование физических принципов улучшения свойств грунтов слабых оснований является приоритетной задачей для целей освоения подземного пространства [9, 10].

Использование радиогидравлического удара при высоких значениях СВЧ создает дополнительные возможности улучшения работы геомассива в целом и совместной безаварийной работы основания с возводимым зданием или сооружением, а также оснований фундаментов объектов окружающей застройки.

Эффект радиогидравлического удара в современном геотехническом строительстве почти не применяется. Требуется большая исследовательская работа по использованию его в части создания установок, а также разработки конкретных технологий с привязкой к типам грунтов.

Список литературы

1. Сиротюк В.В., Архипов В.А. Технология изготовления грунтоплавленных свай на строительной площадке с помощью генератора низкотемпературной плазмы // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1999. № 6.
2. Миронов А.А., Новосельцев М.Г., Базуев В.П. Интенсификация твердения силикатированных грунтов с помощью энергии СВЧ. *Повышение качества материалов дорожного и строительного назначения: Материалы научно-технической конференции*. Омск: СибАДИ, 2001. С. 146–150.
3. Синько А.С. Анализ и совершенствование технологии организации строительства зданий и соору-

References

1. Sirotyuk V.V., Arkhipov V.A. Technology of manufacturing ground-melted piles on a construction site using a low-temperature plasma generator. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 1999. No. 6. (In Russian).
2. Mironov A.A., Novoseltsev M.G., Bazuev V.P. Intensification of hardening of silicated soils using microwave energy. *Improving the quality of road and construction materials. Materials of the scientific and technical conference*. Omsk: SibADI. 2001, pp. 146–150. (In Russian).
3. Sinko A.S. Analysis and improvement of technology for the organization of construction of buildings and

- жений магистральных газопроводов с использованием технической мелиорации грунтов: Дис. ... магистр. Томск, 2016. 98 с.
4. Шавшукова С.Ю. Исторические этапы развития микроволновой техники для научных исследований и промышленных процессов: Дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2008. 322 с.
 5. Рахманкулов Д.Л., Шавшукова С.Ю., Вихарева И.Н. Применение энергии микроволн в горном деле. *Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук: Материалы Международной научно-технической конференции.* Уфа: УГНТУ, 2008. Вып. 3. С. 80–84.
 6. Рахманкулов Д.Л., Шавшукова С.Ю., Вихарева И.Н., Чанышев Р.Р. Опыт применения энергии микроволн в горном деле // *Башкирский химический журнал.* 2008. Т. 15. № 2. С. 114–117.
 7. Рахманкулов Д.Л., Шавшукова С.Ю., Вихарева И.Н. Исторические аспекты создания и развития микроволновой спектроскопии // *История науки и техники.* 2008. № 6. Спец. вып. 3. С. 61–67.
 8. Петров В.М. Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ // *Радиоэлектроника и телекоммуникации.* 2002. № 3.
 9. Соколов Н.С. Электроразрядная технология усиления оснований // *Жилищное строительство.* 2021. № 9. С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-9-36-42>.
 10. Соколов Н.С. Один из случаев усиления основания деформированной противооползневой подпорной стены // *Жилищное строительство.* 2021. № 12. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-12-23-27>
4. Shavshukova S.Yu. Historical stages of development of microwave technology for scientific research and industrial processes. *Cand. Diss. (Engineering).* Ufa. 2008. 322 p. (In Russian).
 5. Rakhmankulov D.L., Shavshukova S.Yu., Vikhareva I.N. Application of microwave energy in mining. *Actual problems of technical, natural and humanitarian sciences: Materials of the International Scientific and Technical Conference.* Ufa: USPTU, 2008. Iss. 3, pp. 80–84. (In Russian).
 6. Rakhmankulov D.L., Shavshukova S.Yu., Vikhareva I.N., Chanyshev R.R. The experience of using microwave energy in mining. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal.* 2008. Vol. 15. No. 2, pp. 114–117. (In Russian).
 7. Rakhmankulov D.L., Shavshukova S.Yu., Vikhareva I.N. Historical aspects of the creation and development of microwave spectroscopy. *Istoriya nauki i tekhniki.* 2008. No. 6, special iss. 3, pp. 61–67. (In Russian).
 8. Petrov V.M. New applications of radioelectronics: softening of rocks by a powerful electromagnetic field of microwave. *Radioelektronika i telekommunikatsii.* 2002. No. 3. (In Russian).
 9. Sokolov N.S. Electric-discharge technology for strengthening bases. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction].* 2021. No. 9, pp. 36–42. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-9-36-42>
 10. Sokolov N.S. One of the cases of strengthening the base of a deformed landslide protection retaining wall. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction].* 2021. No. 12, pp. 23–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-12-23-27>.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Учебное и практическое пособие

Авторы: Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полуниев В.М.

Опыт применения конечно-элементной программы «ПЛАКСИС» (учебное и практическое пособие) / Под редакцией чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, профессора Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2022. 316 с.



В учебном и практическом пособии рассмотрены основные положения, программы и модели грунтов, используемые в конечно-элементном программном комплексе «ПЛАКСИС» (PLAXIS) как в плоской – двухмерной, так и трехмерной постановке. Представлен обширный набор численных примеров, относящихся к расчетам различного типа оснований и фундаментов и даны рекомендации по использованию программ «ПЛАКСИС» (PLAXIS) для решения задач по оценке устойчивости грунтовых оснований, откосов и ограждений котлованов, фильтрационных и консолидационных задач механики грунтов, а также при моделировании задач динамики в грунтовых основаниях.

Предназначено для студентов и аспирантов строительных вузов и факультетов, слушателей курсов и институтов повышения квалификации инженеров-строителей и практикующих инженерно-технических работников проектных и строительных организаций.

УДК666.9

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-65-72>

З.Т.Л. НГУЕН, аспирант (nguyendoantunglam1110@gmail.com),
 В.А. ШВЕЦОВА, зав. лабораторией (wishhuma@mail.ru),
 С.В. САМЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор (samchenko@list.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет НИУ МГСУ
 (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Влияние комплексных добавок на основе глиноземистого цемента и трепела на свойства портландцемента

Проведены исследования влияния комплексных добавок на сроки схватывания портландцемента. В качестве добавок были выбраны глиноземистый цемент, природный гипс и трепел. Для моделирования результатов испытаний использован ортогональный центрально-композиционный план второго порядка Бокса–Уилсона. Сроки схватывания цемента определялись в соответствии с методиками, приведенными в ГОСТ 310.3–76. Результаты исследования представлены в виде поверхностей уравнений регрессии второго уровня, описывающих зависимости начала и конца схватывания цемента от содержания комплексных добавок. В ходе анализа полученных экспериментальных данных были разработаны составы композиционных вяжущих веществ, обладающих максимальным и минимальным временем наступления начала и конца схватывания. На основании аналитического обзора литературы и полученных данных сделаны выводы о возможном влиянии вводимых добавок на сроки схватывания цементного теста.

Ключевые слова: комплексные добавки, глиноземистый цемент, природная минеральная добавка, сроки схватывания, планирование эксперимента, план второго порядка.

Для цитирования: Нгуен З.Т.Л., Швецова В.А., Самченко С.В. Влияние комплексных добавок на основе глиноземистого цемента на свойства портландцемента // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-65-72>

D.T.L. NGUYEN, graduate student (nguyendoantunglam1110@gmail.com),

V.A. SHVETSOVA, head of laboratory (wishhuma@mail.ru),

S.V. SAMCHENKO, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (samchenko@list.ru)

National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Influence of Complex Additives Based on Alumina Cement and Trepel on the Properties of Portland Cement

Studies of the effect of complex additives on the setting time of Portland cement have been carried out. Alumina cement, natural gypsum and trepel (porous silica rock) were chosen as additives. To simulate the test results, an orthogonal second-order Box-Wilson composition plan was used. The cement setting time was determined in accordance with the methods given in GOST 310.3–76 (Russian standard). The results were presented in the form of surfaces of regression equations of the second level, describing the dependences of the beginning and end of cement setting on the content of complex additives. Over the course of the experiment, the results showed the compositions of composite binders with a maximum and minimum of the initial setting time and their final setting times. Based on a review of the literature and the data obtained, conclusions were drawn about the possible effect of the introduced additives on the setting time of the cement paste.

Keywords: complex additives, alumina cement, natural mineral additive, setting time, experiment planning, second-order planning matrix.

For citation: Nguyen D.T.L., Shvetsova V.A., Samchenko S.V. The influences of complex additives based on alumina cement on the properties of Portland cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 65–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-65-72>

Цементная промышленность наряду с электроэнергетикой, металлургией, машиностроением и производством химических веществ показывает потенциал экономики и степень промышленного развития страны. С каждым годом появляется все больше новых строительных материалов, повышаются темпы строительства при сохранении и улучшении качества возводимых конструкций зданий и сооружений. Средний возраст вторичного жилья на территории РФ на начало 2021 г. составил 31 год. Большая часть зданий, не подлежащих ремонту, выводится из жилого фонда при помощи таких мероприятий, как реновация. Здания и сооружения, несущая способность конструкций которых в большей степени сохранена, нуждаются в ремонте. В зависимости от пространственного расположения конструкций (горизонтальные или вертикальные), сезона проведения ремонтных работ (при среднесуточной темпера-

туре воздуха выше или ниже 0°C), срочности набора прочности составом (например, для моментального устранения протечек или, наоборот, для устройства стяжки в квартире) используются различные сухие строительные смеси (ССС). Однако в качестве вяжущего чаще всего используется портландцемент и его различные модификации.

Портландцемент является наиболее распространенным гидравлическим вяжущим во всем мире. В настоящее время выпускаются различные виды цемента: портландцемент, пуццолановый портландцемент, шлакопортландцемент, специальные цементы (декоративный, тампонажный, глиноземистый, сульфатостойкий, цемент для гидротехнических сооружений, быстротвердеющий цемент и др.), выбираемые в зависимости от назначения проектируемых конструкций [1–4]. Во многих странах мира для получения бетонов с улучшенными физико-механическими свойствами

ми широко используются специальные цементы, а также цементы, содержащие различные неорганические добавки, обладающие пуццолановой или гидравлической активностью, например трепел, опоки, диатомит, пеплы, туфы, трассы, микрокремнезем, метакаолин, зола-уноса, зольный остаток, шлаки и др. [5–9]. При добавлении природных пуццоланов процесс гидратации и твердения композиционных вяжущих зависит от множества факторов. Необходимо изучать свойства различных композиционных вяжущих с целью научиться управлять процессами структурообразования и прогнозировать характеристики композитов, получаемых на их основе [10–14].

В настоящей работе были использованы комплексные добавки, состоящие из глиноземистого цемента, гипса и трепела. Глиноземистый цемент относится к специальным цементам, содержащим от 35 до 80% оксида алюминия. Различают глиноземистый и высокоглиноземистый цементы. Глиноземистый цемент содержит от 35 до 49% оксида алюминия [15, 16], высокоглиноземистый цемент – свыше 60% оксида алюминия согласно ГОСТ 969–2019 «Цементы глиноземистые и высокоглиноземистые. Технические условия». Алуминатные цементы обладают некоторыми преимуществами по сравнению с обычным портландцементом. Например, ускоренным набором прочности, повышенным тепловыделением, устойчивостью к истиранию, щелочно-кремнеземной реакции и сульфатному воздействию [17]. Сухие строительные смеси с использованием глиноземистого цемента применяются при зимнем бетонировании и при устранении сильных течей в бетонных конструкциях.

Комплексная добавка на основе глиноземистого цемента и природного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ позволяет регулировать усадку цементных и бетонных образцов. В зависимости от соотношения глиноземистый цемент:гипс и количества полученной расширяющей добавки в составе комплексного вяжущего на основе портландцемента могут быть достигнуты снижение или компенсация усадки, а также расширение бетонных образцов, изготовленных с использованием цементной композиции определенного состава.

В настоящее время портландцемент с активными минеральными добавками производится практически на всех цементных заводах мира. Трепел – природная активная минеральная добавка, которая позволяет получать бетон с более плотной структурой за счет снижения пористости цементного камня. При добавлении трепела происходит связывание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в менее растворимые и мелкодисперсные низкоосновные гидросиликаты кальция [1, 18]. Замена части бездобавочного портландцемента трепелом позволяет значительно снизить себестоимость цемента, повысить водостойкость, уменьшить экзотермию твердения и т. д.

Целью данной работы явилось исследование сроков схватывания композиционного вяжущего, состоящего из портландцемента, глиноземистого цемента, природного гипса и трепела. Для моделирования ре-

зультатов экспериментальной работы был построен ортогональный центрально-композиционный план второго порядка [19, 20]. В результате проведенных испытаний получены зависимости изменения сроков схватывания композиционного вяжущего.

Используемые материалы и методы

Было исследовано влияние различных количеств модифицирующих дисперсных добавок (расширяющей и пуццолановой) на физические свойства композиционного вяжущего. Используемые материалы представлены в табл. 1. Показатели воды затворения соответствуют ГОСТ 23732–2011.

В табл. 2 указаны стандарты, в соответствии с которыми осуществлялось проведение экспериментальных работ.

Влияние состава композиционного вяжущего на сроки схватывания цементного теста было исследовано с помощью метода математического планирования эксперимента Бокса–Уилсона путем построения трехфакторного плана второго порядка. Общий вид модели имеет вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j,$$

где b_0 , b_i , b_{ij} и b_{ij} – коэффициенты регрессии; x_j , x_i представляют фактор; $x_i x_j$ демонстрирует взаимодействие между факторами.

Результаты и обсуждение

Композиционные вяжущие вещества различного состава были получены путем смешивания портландцемента (ПЦ), глиноземистого цемента (ГЦ), гипса (Г) и трепела (Тр) до однородного состояния. С целью нахождения оптимального состава композиционного вяжущего был спроектирован ортогональный центрально-композиционный план второго порядка с количеством опытов $N=15$, значение «звездного плеча» $\alpha=1,215$.

В качестве факторов варьирования были приняты: количество алуминатного цемента (ГЦ), количество гипса (Г), количество трепела (Тр) в процентах от общей массы композиционного вяжущего. Количество портландцемента (ПЦ) оставалось неизменным. Уровни варьирования факторов подобраны на основании обзора отечественных и зару-

Таблица 1
Table 1

Характеристики используемых материалов
Characteristics of the materials used

Наименование	Истинная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г
Евроцемент ЦЕМ I 42,5	3,205	3650
ГЦ-40 (SRB 400, Secar, Франция)	3,195	3475
Природный гипс второго сорта в соответствии с ГОСТ 4013–2019	2,316	2235
Трепел Хотынецкого месторождения	2,395	6355

Таблица 2
Table 2

Стандарты, в соответствии с которыми осуществлялось проведение экспериментальных работ
Standards used in the article

Наименование эксперимента	Используемые стандарты
Определение удельной поверхности	ГОСТ 21043-87
Определение истинной плотности исходных материалов	ГОСТ 30744-2001
Определение сроков схватывания	ГОСТ 310.3-76

Таблица 3
Table 3

Факторы варьирования
Variation factors

Наименование	Фактор		Уровни варьирования фактора			Интервал варьирования
	Обозначение		-1	0	+1	
	Натуральное	Нормализованное (кодированное)				
% ГЦ	X_1	x_1	10	12	14	2
% Г	X_2	x_2	7,5	10	12,5	2,5
% Тр	X_3	x_3	12	16	20	4

Таблица 4
Table 4

Матрица планирования и результаты эксперимента
Planning matrix and experiment results

№ опыта	%ГЦ	%Г	%Тр	Кодированное значение фактора							y_1 мин	y_2 мин
				x_0	x_1	x_2	x_3	x'_1	x'_2	x'_3		
1	10	7,5	12	+1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	30	105
2	14	7,5	12	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	25	60
3	10	12,5	12	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	35	95
4	14	12,5	12	+1	+1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	25	50
5	10	7,5	20	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	30	100
6	14	7,5	20	+1	+1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	25	65
7	10	12,5	20	+1	-1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	40	130
8	14	12,5	20	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	25	65
9	9,57	10	16	+1	-1,215	0	0	0,746	-0,73	-0,73	30	85
10	14,43	10	16	+1	1,215	0	0	0,746	-0,73	-0,73	20	50
11	12	6,96	16	+1	0	-1,215	0	-0,73	0,746	-0,73	20	70
12	12	13,04	16	+1	0	1,215	0	-0,73	0,746	-0,73	35	75
13	12	10	11,14	+1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,746	25	55
14	12	10	20,86	+1	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,746	25	75
15	12	10	16	+1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	30	75

бежных научно-технических источников и приведены в табл. 3.

Результаты экспериментов представлены в табл. 4, где y_1 – функция отклика, представляющая время начала схватывания (мин); y_2 – функция отклика, представляющая время конца схватывания (мин).

Коэффициенты уравнения регрессии, представленные в табл. 5, были рассчитаны по формулам (4.8), (4.9), (4.10), (4.11), (4.14), представленным на с. 117 [21].

В результате были получены следующие уравнения регрессии:

$$y_1 = 25,66 - 4,31x_1 + 3,03x_2 + 0,46x_3 - 1,88x_1x_2 - 0,63x_1x_3 + 0,63x_2x_3 - 0,63x_1x_2x_3 + 0,51(x_1)^2 + 2,2(x_2)^2 + 0,51(x_3)^2; \quad (1)$$

$$y_2 = 62,65 - 21,23x_1 + 1,47x_2 + 6,78x_3 - 3,75x_1x_2 - 1,25x_1x_3 + 6,25x_2x_3 - 3,75x_1x_2x_3 + 5,99(x_1)^2 + 9,37(x_2)^2 + 4,3(x_3)^2. \quad (2)$$

Для проверки коэффициентов уравнения регрессии (1) и (2) были проведены дополнительные опы-

ты в количестве трех экспериментов в центре плана при $x_1 = x_2 = x_3 = 0$. Полученные результаты представлены в табл. 6.

Дисперсия воспроизводимости опыта была рассчитана по формуле:

$$S_{ll}^2 = \frac{\sum_{a=1}^m (Y_{0a} - \bar{Y}_0)^2}{m-1}, \quad (3)$$

где m – количество опытов в центре плана.

Для проверки значимости коэффициентов b уравнений (1) и (2) были определены стандартные отклонения по формулам:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_{ll}^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}} \quad \forall i = \overline{1, k}; \quad (4)$$

$$S_{b_0} = \sqrt{S_{b'_0}^2 + \sum_{i=1}^k S_{b_{ii}}^2 (\bar{x}_i)^2}; \quad (5)$$

$$S_{b'_0} = \sqrt{\frac{S_{ll}^2}{15}}. \quad (6)$$

Таблица 5
Table 5

Коэффициенты уравнения регрессии
Regression equation coefficients

№ п/п	y_j	b'_0	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
1	y_1	28	25,66	-4,31	3,03	0,46	-1,88	-0,63	0,63	-0,63	0,51	2,2	0,51
2	y_2	77	62,65	-21,23	1,47	6,78	-3,75	-1,25	6,25	-3,75	5,99	9,37	4,3

Коэффициент Стьюдента t_{bj} считался значимым, если $|t_{bj}| \geq t_{p,f_2}$ [21].

Согласно [21] в приложении 5 $\Rightarrow t_{p,f_2}=3,182$ ($p=0,05$; $f_2=m-1=4-1=3$ – число степеней свободы). Значения t_{bj} были определены по формуле:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}} \quad (7)$$

Результаты проверки представлены в табл. 7:

После проверки коэффициентов незначительные отбрасывались. Таким образом, были получены следующие уравнения:

$$y_1 = 25,66 - 4,31x_1 + 3,03x_2 - 1,88x_1x_2 + 2,2(x_2)^2; \quad (8)$$

$$y_2 = 62,65 - 21,23x_1 + 6,78x_3 + 6,25x_2x_3 + 9,37(x_2)^2. \quad (9)$$

Далее производилась проверка адекватности полученной модели.

По полученному уравнению регрессии были вычислены расчетные значения \hat{y} для каждого опыта по уточненной модели, а также квадратов отклонений расчетного значения от фактического $(y - \hat{y})^2$ для всех опытов.

Для проверки совместимости модели определялась дисперсия адекватности модели S_d^2 и критерий Фишера $F_{расч}$ по формулам:

$$F_{расч} = \frac{S_d^2}{S_{II}^2}; \quad (10)$$

Проверка коэффициентов уравнений регрессии
Verification of coefficients of regression equations

Коэффициенты уравнений регрессии	b'_0	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Для y_1 (1)	28	25,66	-4,31	3,03	0,46	-1,88	-0,63	0,63	-0,63	0,51	2,2	0,51
Для y_2 (2)	77	62,65	-21,23	1,47	6,78	-3,75	-1,25	6,25	-3,75	5,99	9,37	4,3
Стандартные отклонения	$S_{b'0}$	S_{b0}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}	S_{b12}	S_{b13}	S_{b23}	S_{b123}	S_{b11}	S_{b22}	S_{b33}
Для y_1 (1)	0,325	0,828	0,380	0,380	0,380	0,445	0,445	0,445	0,445	0,603	0,603	0,603
Для y_2 (2)	1,236	3,152	1,447	1,447	1,447	1,693	1,693	1,693	1,693	2,292	2,292	2,292
Критерии Стьюдента	-	t_{b0}	t_{b1}	t_{b2}	t_{b3}	t_{b12}	t_{b13}	t_{b23}	t_{b123}	t_{b11}	t_{b22}	t_{b33}
Для y_1 (1)	-	30,99	-11,342	7,974	1,211	-4,225	-1,416	1,416	-1,416	0,846	3,648	0,846
Для y_2 (2)	-	19,876	-14,672	1,016	4,686	-2,215	-0,738	3,692	-2,215	2,613	4,088	1,876
Коэффициенты значимые ($ t_{bj} > 3,182$)	-	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Для y_1 (1)	-	Знач.	Знач.	Знач.		Знач.					Знач.	
Для y_2 (2)	-	Знач.	Знач.		Знач.			Знач.			Знач.	

Таблица 6
Table 6

Результаты эксперимента в центре плана
The results of the experiment in the center of the plan

Свойства	№ п/п	y_1^0	y_2^0	y_3^0	y_4^0	Средне-арифметическое значение \bar{y}^0
Начало схватывания, мин	32	30	29	30		$\bar{y}_1^0 = 30,25$
Конец схватывания, мин	80	70	80	75		$\bar{y}_2^0 = 76,25$

$$S_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{N - \nu}, \quad (11)$$

где ν – количество значимых коэффициентов в уравнении регрессии (включая b_0).

Расчетное значение $F_{расч}$ сравнивалось с табличным отношением $F_{табл}$ (приложение 7 [21]) для уровня значимости $p=0,05$ и чисел степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_2=3$ и f_1 число степеней свободы дисперсии адекватности: $f_1=N-\nu$. Полученное соотношение $F_{расч} < F_{табл}$ позволяет принять гипотезу об адекватности регрессионной модели. Проверка адекватности полученной модели представлена в табл. 8.

При помощи компьютерной программы Origin были получены изображения поверхностей выражения целевой функции для уравнений регрессии (8) и (9), которые представлены на рис. 1 и 2.

Таблица 7
Table 7

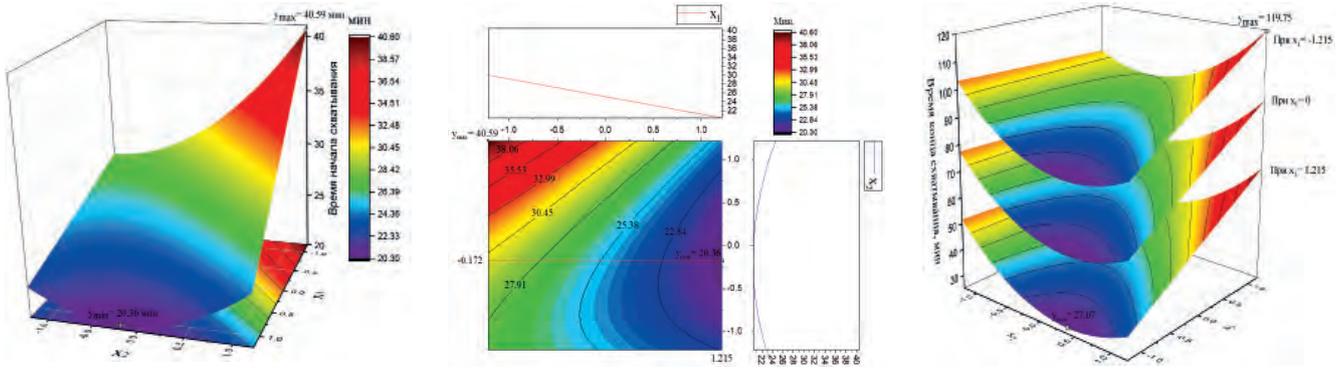


Рис. 1. Поверхность уравнения регрессии (8)
Fig. 1. Surface of regression equation

Таблица 8
Table 8

Проверка адекватности уравнений регрессии
Verification of adequacy of regression equations

№ опыта	Для y_1 (8)		Для y_2 (9)	
	Расчетное значение \hat{y}_i , МИН	Фактические результаты опытов y_i , МИН	Расчетное значение \hat{y}_i , МИН	Фактические результаты опытов y_i , МИН
1	27,25	30	92,72	105
2	22,41	25	50,26	60
3	37,07	35	80,22	95
4	24,71	25	37,76	50
5	27,25	30	93,78	100
6	22,41	25	51,32	65
7	37,07	40	106,28	130
8	24,71	25	63,82	65
9	30,88	30	88,44	85
10	20,44	20	36,86	50
11	25,23	20	76,48	70
12	32,59	35	76,48	75
13	25,66	25	54,41	55
14	25,66	25	70,89	75
15	25,66	30	62,65	75
Дисперсия адекватности модели S_{d}^2	9,542		180,223	
Дисперсия воспроизводимости S_{ff}^2	1,583		22,917	
f_1	10		10	
f_2	3		3	
Критерий Фишера, $F_{расч}$	6,028		7,864	
$F_{табл}, p=0,05$	8,767		8,767	
Вывод	Уравнение адекватно		Уравнение адекватно	

Обсуждение

Для нахождения максимального и минимально значений и зависимости изменения времени начала схватывания композиционного вяжущего от количества минеральных добавок было получено уравнение (8):

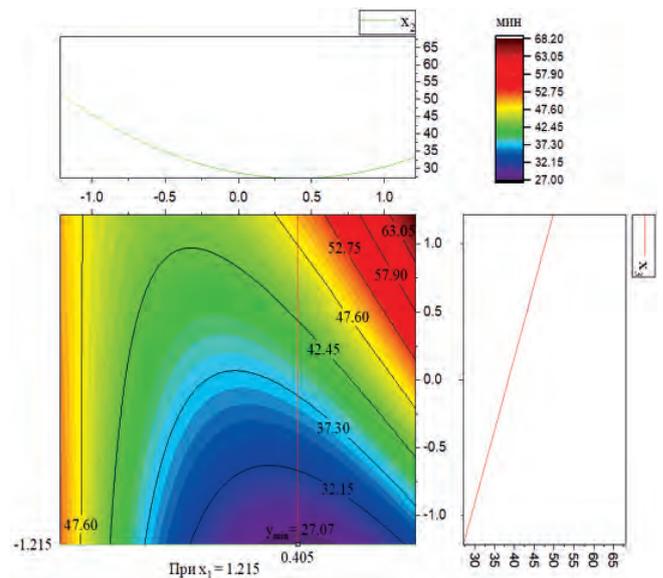
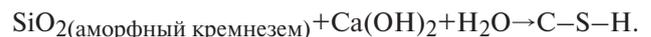


Рис. 2. Поверхность уравнения регрессии (9)
Fig. 2. Surface of regression equation

$$y_1 = 25,66 - 4,31x_1 + 3,03x_2 - 1,88x_1x_2 + 2,2(x_2)^2.$$

Функция отклика показала, что содержание трепела не влияет на время начала схватывания вяжущего (коэффициент при переменной x_3 равен 0). Это связано с тем, что трепел – активная минеральная добавка (АМД), которая по мере гидратации клинкерных минералов вступает во взаимодействие с гидроксидом кальция $Ca(OH)_2$, образуя низкоосновные гидросиликаты кальция C–S–H по схеме реакции:



Согласно предложенной Х. Тейлором схеме процесса гидратации цемента, реакции продуктов гидратации цемента с АМД являются вторичными процессами.

С увеличением количества гипса (в заданных диапазонах варьирования) в композиционной вяжущей смеси время начала схватывания композиционного вяжущего теста замедляется. Присутствие квадратичного члена (x_2^2) в уравнении регрессии свидетельствует о квадратичной зависимости сроков схватывания цементного теста от количества природного гипса.

Таблица 9
Table 9

Максимальное и минимальное значения начала схватывания
Maximum and minimum values for the start of setting

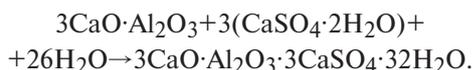
	Кодированное значение фактора			% ГЦ	% Г	% Тр
	x_1	x_2	x_3			
$y_{1max} = 40,60$ мин	-1,215	1,215	-	9,57	13,04	-
$y_{1min} = 20,36$ мин	1,215	-0,172	-	14,43	9,57	-

Таблица 10
Table 10

Максимальное и минимальное значения конца схватывания
Maximum and minimum values for the end of setting

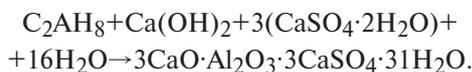
	Кодированное значение фактора			% ГЦ	% Г	% Тр
	x_1	x_2	x_3			
$y_{2max} = 119,75$ мин	-1,215	1,215	1,215	9,57	13,04	20,86
$y_{2min} = 27,07$ мин	1,215	0,405	-1,215	14,43	11,01	11,14

Как известно, при добавлении гипса происходит реакция образования гидросульфоалюмината кальция:



Гидросульфоалюминаты кальция имеют две модификации: трехсульфатную форму (эттрингит) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot (30-32)\text{H}_2\text{O}$ и моносульфатную форму $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot (8-12)\text{H}_2\text{O}$. Образующий гидросульфоалюминат кальция на поверхности зерен цемента замедляет процесс гидратации, что позволяет регулировать сроки схватывания.

Проведенный эксперимент показал, что глиноземистый цемент значительно ускоряет наступление начала схватывания (отрицательный коэффициент -4,31 при переменной x_1). Отрицательный коэффициент -1,88 при переменной x_1x_2 свидетельствует о том, что комплексная добавка глиноземистый цемент+гипс также ускоряет наступление начала схватывания цементного теста. Объясняется это тем, что выделяющийся при твердении цемента $\text{Ca}(\text{OH})_2$ быстро соединяется с появляющимся при твердении ГЦ гидроалюминатом кальция и гипсом, образуя эттрингит по реакции:



В результате $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из сферы действия реакции исчезают, что значительно ускоряет ход гидролиза $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Процесс схватывания при этом сильно ускоряется. С помощью программы Excel были получены максимальное и минимальное значения начала схватывания, представленные в табл. 9.

Аналогичным образом было проанализировано уравнение (9):

$$y_2 = 62,65 - 21,23x_1 + 6,78x_3 + 6,25x_2x_3 + 9,37(x_2)^2.$$

Коэффициент b_1 значительно больше, чем остальные в уравнении (9). Это указывает на большое влияние глиноземистого цемента на время окончания

схватывания композиционного вяжущего. С увеличением количества алюминатного цемента время конца схватывания уменьшается.

С уменьшением количества гипса (в заданных диапазонах варьирования) происходит увеличение времени твердения композиционного вяжущего. Объяснение механизма влияния гипса на сроки схватывания цементного теста приведено выше.

Трепел Хотынецкого месторождения имеет высокую удельную поверхность ($6355 \text{ см}^2/\text{г}$) и способен иммобилизовать некоторое количество воды затвердения, таким образом влияя на сроки схватывания цементного теста. Для установления степени влияния дисперсности трепела на длительность схватывания цементного теста необходимо исследовать сроки схватывания композиционного цемента, содержащего только портландцемент и трепел.

С помощью программы Excel получили максимальную и минимальную точки значений, представленных в табл. 10.

Выводы

На основании анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы:

1. Используя алгоритм экспериментального планирования, были найдены два уравнения регрессии, описывающие взаимосвязь между целевыми функциями: временем начала и конца схватывания композиционного вяжущего в зависимости от количества содержания минеральных добавок. Полученные уравнения регрессии второго порядка (8) и (9) описывают зависимость сроков схватывания композиционного вяжущего от процентного соотношения входящих в его состав компонентов.

2. С помощью компьютерных программ были получены изображения поверхностей уравнений (8) и (9), представленные на рис. 1, 2.

3. Максимальное и минимальное значения времени начала и конца схватывания с соответствующими составами комплексных добавок представлены в табл. 7 и 8.

4. Авторы этого исследования занимаются изучением свойств композиционных вяжущих веществ с целью разработки расширяющегося ремонтного состава. В дальнейшем планируется исследовать такие

свойства разработанного композиционного вяжущего вещества, как: прочность, пористость, усадка (расширение) цементного камня, удельная поверхность, истинная плотность, водопотребность и т. п.

Список литературы

1. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бикбаев Р.Р., Пиксайкина А.А. Исследование свойств портландцементов с активной минеральной добавкой на основе трепела // *Вестник ПГТУ*. 2019. № 3. С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.3.7>
2. Panesar D.K., Zhang R. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 251. 118866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118866>
3. Zemri C., Bouiadjra M.B. Comparison between physical – mechanical properties of mortar made with Portland cement (CEMI) and slag cement (CEMIII) subjected to elevated temperature // *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 12. E00339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00339>
4. Нгуен З.Т.Л., Самченко С.В. Изучение влияния комплексных добавок на свойства цемента. *XXIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени выдающихся химиков Л.П. Кулева и Н.М. Кижнера*. 2022. Т. 1. С. 121–122.
5. Танг В.Л., Нгуен З.Т.Л., Самченко С.В. Влияние золошлакового отхода на свойства сульфатостойкого портландцемента // *Вестник МГСУ*. 2019. № 8. С. 991–1003. DOI: [10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003)
6. Ивашина М.А., Кривобородов Ю.Р. Использование отходов промышленности в технологии сульфатостойкого клинкера. *XIII Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии (МКХТ-2017). Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. XXXI. № 1. С. 22–24.
7. Танг В.Л., Нго С.Х., Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Орехова А.Ю., Тюрина А.А. Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 8. С. 10–18. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511
8. Потапова Е.Н., Гусева Т.В., Тихонова И.О., Канишев А.С., Кемп Р.Г. Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20>
9. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 524 с.
10. Гувалов А.А., Кузнецова Т.В., Аббасова С.И. Повышение эффективности цементных вяжущих

References

1. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bikbaev R.R., Pikaikina A.A. Investigation of the properties of Portland cement with the active mineral additive based on trepel. *Vestnik PGTU*. 2019. No. 3, pp. 7–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.3.7>
2. Panesar D.K., Zhang R. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 251. 118866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118866>
3. Zemri C., Bouiadjra M.B. Comparison between physical – mechanical properties of mortar made with Portland cement (CEMI) and slag cement (CEMIII) subjected to elevated temperature. *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 12. E00339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00339>
4. Nguyen D.T.L., Samchenko S.V. The effect of complex additives on the properties of cement. *XXIII International scientific – practical conference of students and young scientists “Chemistry and chemical technology in the XXI century” named after outstanding chemists Kulev L.P. and Kizhner N.M.* 2022. Vol. 1, pp. 121–122. (In Russian).
5. Tang V.L., Nguyen D.T.L., Samchenko S.V. The influence of the addition of ash and slag waste on the properties of sulfoaluminate Portland cement. *Vestnik MGSU*. 2019. No. 8, pp. 991–1003. (In Russian). DOI: [10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003)
6. Ivashina M.A., Krivoborodov Yu.R. Use of waste industry in sulfoaluminate clinker technologies. *XIII International Congress of Young Scientists in Chemistry and Chemical Technology (ICCT-2017). Advances in the field of chemistry and chemical technologies*. 2017. Vol. XXXI. No. 1, pp. 22–24. (In Russian).
7. Tang V.L., Ngo X.H., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A., Orekhova A.Yu., Tyurina A.A. The use of ash and slag waste as additional cementing material. *Vestnik BGTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 8, pp. 10–18. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b6d58455b5832.12667511
8. Potapova E.N., Guseva T.V., Tikhonova I.O., Kanishev A.S., Kemp R.G. Cement production: Aspects of the resource efficiency enhancement and negative environmental impact reduction. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020. No. 9, pp. 15–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20>
9. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona [Concrete technology]*. Moscow: ASV. 2011. 524 p.
10. Guvalov A.A., Kuznetsova T.V., Abbasova S.I. Improving the efficiency of cement binders with the use of silica-containing modifier. *Stroitel'nye Materialy*

- с использованием кремнеземсодержащего модификатора // *Строительные материалы*. 2018. № 11. С. 56–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-56-59>
11. Угляница А.В., Дуваров В.Б. Модификация цементных бетонов отработанным катализатором производства капролактама // *Инновации и инвестиции*. 2019. № 6. С. 286–290.
 12. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Вагин В.С., Ляшенко В.И. Эффективность минеральных добавок к вяжущему для приготовления твердеющих смесей при подземных работах // *Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. Т. 77. № 6. С. 643–650. DOI: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-6-643-650>
 13. Кузнецова Т.В., Гувалов А.А., Аббасова С.И. Модификатор на основе цеолитсодержащей породы для получения цементных композиций // *Техника и технология силикатов*. 2016. Т. 3. № 1. С. 22–24.
 14. Гавшина О.В., Яшкина С.Ю., Яшкин А.Н., Дороганов В.А., Морева И.Ю. Исследование влияния дисперсных добавок на сроки схватывания и микроструктуру высокоглиноземистого цемента // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Т. 1. № 4. С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2018-1-4-30-37>
 15. Кривобородов Ю.Р., Кузнецова Т.В. Влияние пластификатора на свойства алюминатных цемента // *Сухие строительные смеси*. 2019. № 5. С. 8–10.
 16. Кузнецова Т.В., Талабер Й. Глиноземистый цемент. М: Стройиздат, 1988. 272 с.
 17. Cantaluppi M., Marinoni N., Cella F., Bravo A., Cámara F., Borghini G., Kagan W. An insight on the effect of sodium and silicon on microstructure and crystallography of high alumina cements // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 148. 106533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106533>
 18. Танг В.Л., Нгуен З.Т.Л. Пуццоланическая активность тонкодисперсных минеральных компонентов различной природы Вьетнама // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 28. № 1. С. 7–12.
 19. Bektas F., Bektas B.A. Analyzing mix parameters in ASR concrete using response surface methodology // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66, pp. 299–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.055>
 20. Vu K.Z., Bazhenova S.I., Do M.Ch., Hoang M.T., Nguen V.Z., Nguen Z.T.L. Оптимизация пропорций смеси пенобетона с использованием плана экспериментов Бокса–Уилсона // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 5. С. 606–620.
 21. Nguyễn Minh Tuyển. Quy hoạch thực nghiệm [Experimental Planning]. Hanoi: NXB Khoa học và Kỹ thuật. 2007. 264 p.
 22. Танг В.Л., Нго С.Х., Ву К.З., Булгаков Б.И. Влияние комплексной органо-минеральной добавки на деформацию гидротехнических бетонов // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 4. С. 7–19. DOI: [10.18720/CUBS.79.1](https://doi.org/10.18720/CUBS.79.1) [Construction Materials]. 2018. No. 11, pp. 56–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-56-59>.
 11. Uglyanitsa A.V., Duvarov V.B. Modification of cement concretes with the spent catalyst of the production caprolactam. *Innovatsii i investitsii*. 2019. No. 6, pp. 286–290. (In Russian).
 12. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Vagin V.S., Lyashenko V.I. Efficiency of mineral additives to binding component for making hardening mixtures at underground operations. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021. Vol. 77. No. 6, pp. 643–650. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-6-643-650>.
 13. Kuznetsova T.V., Guvalov A.A., Abbasova S.I. Modifier based on zeolite-containing rocks for the cement composition manufacture. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2016. Vol. 3. No. 1, pp. 22–24. (In Russian).
 14. Gavshina O.V., Yashkina S.Yu., Yashkin A.N., Doroganov V.A., Moreva I.Yu. Study of the effect of particulate additives on the setting time and microstructure of high-alumina cement. *Construction Materials and Products*. 2018. Vol. 1. No. 4, pp. 30–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2018-1-4-30-37>.
 15. Krivoborodov Yu. R., Kuznetsova T. V. Effect of plasticizer on the properties of aluminate cements. *Sukhie stroitel'nye smesi*. 2019. No. 5, pp. 8–10. (In Russian).
 16. Kuznetsova T.V., Talaber I. Glinozemnistyi tsement [Alumina cement]. Moscow: Stroyizdat. 1988. 272 p.
 17. Cantaluppi M., Marinoni N., Cella F., Bravo A., Cámara F., Borghini G., Kagan W. An insight on the effect of sodium and silicon on microstructure and crystallography of high alumina cements. *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 148. 106533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106533>
 18. Tang V.L., Nguyen D.T.L. Pozzolanic activity of finely dispersed mineral components of various nature in Vietnam. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov* [Technique and technology of silicates]. 2021. Vol. 28. No. 1, pp. 7–12. (In Russian).
 19. Bektas, F., Bektas, B.A. Analyzing mix parameters in ASR concrete using response surface methodology. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66, pp. 299–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.055>
 20. Vu K.Z., Bazhenova S.I., Do M.Ch., Khoang M.T., Nguen V.Z., Nguyen D.T.L. Optimizing foam concrete mix proportions using the Box-Wilson experimental design. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2021. No. 5, pp. 606–620. (In Russian).
 21. Nguyễn Minh Tuyển. Quy hoạch thực nghiệm [Experimental Planning]. Hanoi: NXB Khoa học và Kỹ thuật. 2007. 264 p. (In Vietnamese).
 22. Tang V.L., Ngo X.H., Vu K.D., Bulgakov B.I. Influence of a complex organo-mineral additive on the deformation of hydrotechnical concrete. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2019. No. 4, pp. 7–19. (In Russian).

УДК 666.914.5

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>

В.Б. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ¹, д-р техн. наук (victoriapetrop@gmail.com),
 М.Ю. ЗАВАДЬКО¹, инженер (79043517876@yandex.ru),
 Т.Б. НОВИЧЕНКОВА¹, канд. техн. наук (tanovi.69@mail.ru),
 К.С. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ¹, канд. техн. наук (kspetropavlovsky@gmail.com);
 А.Ф. БУРЬЯНОВ², д-р техн. наук (rga-service@mail.ru)

¹ Тверской государственный технический университет (170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22)

² Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1

На ТЭС, помимо зол-уноса, улавливаемых фильтрами, и топливных шлаков, образующихся в топке котла, накапливается большое количество отходов золошлаков, удаляемых мокрым способом. Наиболее перспективным направлением по использованию золошлаковых отходов (ЗШО) является вовлечение их во вторичный оборот в производстве строительных материалов. Утилизация ЗШО гидроудаления из отвалов представляет наибольшую трудность ввиду неоднородности их состава, свойств, высокой загрязненности и т. д. Однако в последние годы нарастает интерес к данному отходу со стороны исследователей и производителей, что обусловлено новыми возможностями по их переработке и обогащению. Вовлечение ЗШО в производство ССС может привести к масштабному сокращению вывоза их на свалки и золоотвалы. В работе приведены результаты исследования добавки алюмосиликатного компонента, выделяемого флотацией из ЗШО гидроудаления, в сухие строительные смеси. Введение дисперсной добавки позволяет регулировать свойства и структуру получаемого модифицированного камня. Присутствие аморфной фазы наноразмерного масштаба обеспечивает получение уплотненной и упрочненной структуры композиции. Проведенная оценка эффективности применения алюмосиликатной добавки в составе ССС подтвердила экономическую целесообразность предлагаемого подхода к утилизации.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, гашеная известь, золошлаковые отходы (ЗШО), гидроудаление, флотация, алюмосиликатная микросфера.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

Для цитирования: Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1 // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>

V.B. PETROPAVLOVSKAYA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (victoriapetrop@gmail.com),

M.Y. ZAVADKO¹, Engineer (79043517876@yandex.ru),

T.B. NOVICHENKOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (tanovi.69@mail.ru),

K.S. PETROPAVLOVSKII¹, Candidate of Sciences (Engineering) (kspetropavlovsky@gmail.com);

A.F. BURYANOV², Doctor of Sciences (Engineering) (rga-service@mail.ru)

¹ Tver State Technical University (22, Afanasiya Nikitina, Tver, 170026, Russian Federation)

² Moscow State University of Civil Engineering (129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26)

Prospects for the Bottom Ash From Hydraulic Removal use if in Dry Building Mixtures. Part 1

At TPPs, in addition to fly ash and fuel slag formed in the boiler furnace, a large amount of ash and slag waste accumulates, which are removed by the wet method. The most promising direction for the use of ash and slag waste (ASW) is their involvement in secondary circulation in the production of building materials. Disposal of ASW from hydraulic removal from dumps is the most difficult due to the heterogeneity of their composition, properties, high pollution, etc. However, in recent years, there has been a growing interest in this waste from researchers and manufacturers, due to new opportunities for their processing and enrichment. The involvement of ASW in the production of dry mortar can lead to a large-scale reduction in their export to landfills and ash dumps. The paper presents the results of a study of the addition of an aluminosilicate component, released by flotation from the ASW of hydraulic removal, in dry building mixtures. The introduction of a dispersed additive allows you to control the properties and structure of the resulting modified stone. The presence of an amorphous nanoscale phase provides a compacted and strengthened structure of the composition. The evaluation of the effectiveness of the use of an aluminosilicate additive in the composition of the SSS confirmed the economic feasibility of the proposed approach to disposal.

Keywords: gypsum binder, slaked lime, ash and slag waste, hydraulic removal, flotation, aluminosilicate microsphere.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 21-79-30004).

For citation: Petropavlovskaya V.B., Zavadko M.Y., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F. Assessment of the possibility of using hydraulic ash as a component of dry building mixtures. Part 1. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 73–79. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>

Низкие риски энергообеспечения угольными электростанциями, связанные с высокой доступностью угля, обуславливают их повсеместную распространенность, сохраняющуюся даже на фоне современных тенденций разворота развитых государств в сторону возобновляемой энергетики [1] и использования техногенного биотоплива в развивающихся странах [2]. Однако для угледобывающих предприятий характерно образование большого количества отходов производства и потребления: при сжигании твердого топлива образуется большое количество ЗШО, складирование которых в золоотвалах является источником загрязнения почв и подземных вод и приводит к ежегодно возрастающему уровню загрязнения окружающей среды [3]. В связи с этим на сегодняшний день актуальны вопросы наиболее эффективного применения складированных золошлаковых отходов в качестве вторичных ресурсов [4]. В последние годы отмечается нарастание интереса к исследованиям продуктов переработки угля. Помимо зол-уноса, интерес проявляется и к золошлаковым отходам гидроудаления.

Наиболее перспективным направлением использования подобных отходов является их вовлечение во вторичный оборот в качестве добавок-наполнителей в ССС. Для более эффективного применения ЗШО целесообразно разделять их, выделяя отдельные фракции, компоненты, вещества и т. д. Создание материалов с применением отдельных компонентов ЗШО отвечает сразу нескольким целям: утилизация отходов промышленности в реальное производство и получение новых материалов, обладающих уникальными свойствами.

Опыт, накопленный за последние годы исследований, позволяет наметить основные пути применения ЗШО [5, 6] в зависимости от классификационной группы:

- зола-уноса (полученная при сухом удалении, осаждении частиц в циклонах и электрофильтрах и накопленная в силосах);

- топливные шлаки (полученные в результате осаждения расплава при полном плавлении части топлива в нижней части топки котла);

- золошлаковая смесь (полученная при мокром удалении и направленная в золоотвал в виде пульпы).

Известны способы утилизации золы-уноса в производстве огнеупорных и теплоизоляционных керамических материалов, в качестве источника оксидов алюминия и кремния [7]. Пуццолановая активность золы-уноса, обусловленная присутствием аморфного алюмосиликата, позволяет также успешно применять ее в качестве заменителя цемента при производстве бетонов без ущерба долговечности и прочности [8–10]. Зола в составе пенобетонов эффективно выполняет роль наполнителя с микропорами, повышающего теплоспротивление стенового материала. Известны также способы утилизации в качестве плавня при производстве керамических плиток [5]. Наиболее перспективным на-

правлением утилизации золы-уноса непостоянного состава угольных ТЭС, работающих с сырьем разных месторождений, является производство пористых заполнителей, например аглопорита [11]. Однако известные технологии его получения, как и других гранулированных пенонаполнителей, достаточно трудоемки и затратны, что отражается на их эффективности.

Таким образом, наиболее перспективной с точки зрения утилизации без предварительной обработки группой ЗШО, по мнению многих авторов, является зола-уноса. В строительной отрасли она достаточно востребована в дорожном строительстве, производстве бетона, керамических и теплоизоляционных материалов и многих других. И напротив, наибольшее количество трудностей при утилизации в производство новых материалов связано с ЗШО гидроудаления, что обусловлено в первую очередь неоднородностью их состава, свойств и загрязненностью [12]. Это делает практически невозможным применение отвалных зол гидроудаления без предварительной подготовки и обогащения. В ее составе, как правило, содержится от 5 до 25% несгоревшего угля, от 5 до 20% – магнитных минералов и алюмосиликатных компонентов [12].

Наибольшей ценностью с точки зрения строительного материаловедения, вероятно, обладает алюмосиликатный компонент ЗШО, представляющий собой сфероидальные частицы нано- и микро размеров с оболочкой из чистого оксида алюминия. Известно, что применение подобных алюмосиликатных микросфер в производстве сухих строительных смесей улучшает их качество, эксплуатационные свойства, снижает стоимость и способствует повышению коррозионной стойкости материалов, повышению долговечности, износостойкости и улучшению изоляционных свойств [11].

Как правило, исследователи рассматривают применение компонентов ЗШО в системах на цементном вяжущем в качестве альтернативы бездобавочного портландцемента или в качестве замены кварцевого песка как мелкого наполнителя. Однако ввиду поиска и развития в настоящее время направлений альтернативного производства вяжущих, обусловленных антропогенными выбросами углекислого газа в цементной промышленности, проявляется все больший интерес к бесцементным модифицированным системам [14, 15].

Целью проведения данных исследований являлось установление закономерностей влияния алюмосиликатной микросферы на процессы структурообразования модифицированных гипсовых композиций, используемых для производства сухих строительных смесей.

При проведении экспериментальных исследований в качестве компонентов применялись:

- гипсовое вяжущее марки Г-4 Самарского гипсового комбината;

- известь гашеная Угловского комбината;

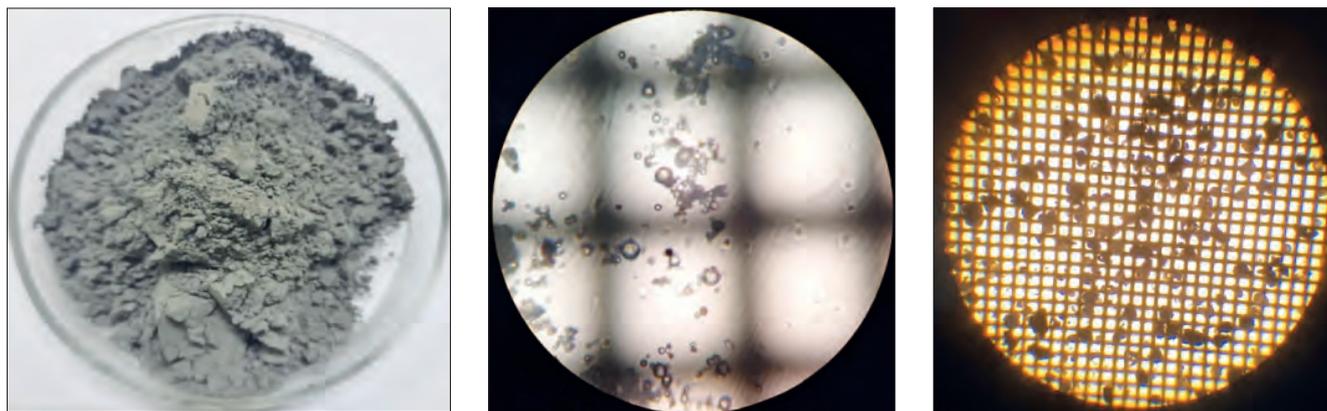


Рис. 1. Алюмосиликатная зольная микросфера
Fig. 1. Aluminosilicate ash microsphere

Химический состав алюмосиликатной зольной микросферы
Chemical composition of aluminosilicate ash microsphere

Таблица 1
Table 1

SiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SiO ₃	C	Na ₂ O
57,38	1,68	4,42	4,83	2,21	24,9	0,11	0,95	0,42	0,11	3,36	0,63

– алюмосиликатная зольная микросфера, полученная обогащением отвальной золы;

– поликарбоксилатный пластификатор Фрипласт.

В качестве компонента в составах применялся продукт переработки ЗШО – алюмосиликатная зольная микросфера. Исходным материалом для получения алюмосиликатного зольного компонента являлась зола гидроудаления Каширской ГРЭС, технологическая схема обогащения которой позволяет фракционировать золошлаковую смесь и обеспечивать постоянство состава и свойств каждого из компонентов (углеродного, магнетитового и алюмосиликатного). Процесс обогащения включал следующие этапы: основная флотация, контрольная флотация, магнитная сепарация и грохочение [16, 17]. Данный компонент представляет собой бурый порошок алюмосиликатных микросфер (рис. 1). Химический состав алюмосиликатной микросферы см. в табл. 1.

Физико-механические свойства сырьевых компонентов, а также полученных композитов определялись в аттестованной лаборатории Тверского государственного технического университета с использованием стандартных методик. Структурные характеристики исследовались с применением рентгенофазового и микроструктурного анализа, проведенного в лабораториях физико-химического анализа и центрах коллективного пользования на базе Тверского государственного технического университета и Тверского государственного университета. Оптимизация составов производилась с использованием методов математического планирования экспериментов.

Наибольшая прочность, как показали результаты физико-механических испытаний гипсового камня, модифицированного добавками гашеной из-

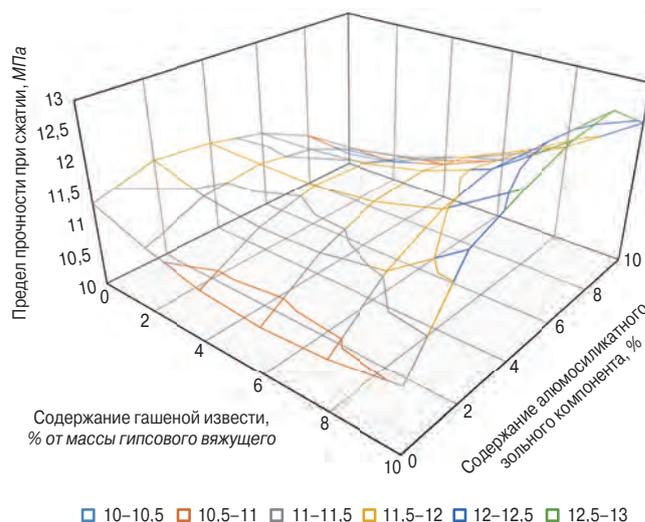


Рис. 2. Влияние содержания гашеной извести и алюмосиликатной микросферы золы гидроудаления на предел прочности при сжатии модифицированного гипсового камня

Fig. 2. Effect of lime content and aluminosilicate microspheres on the compressive strength of modified gypsum

вести и алюмосиликатного компонента ЗШС, достигается для составов гипсовой композиции с содержанием алюмосиликатной добавки в количестве 7% и гашеной извести – в количестве 10% от массы гипсового вяжущего, что обусловлено несколькими факторами: повышением плотности упаковки за счет введения дисперсной алюмосиликатной добавки и дополнительного образования гидросульфалюминатов в кристаллическом каркасе кристаллизующегося камня (рис. 2).

Размеры алюмосиликатных сфер достигают наноразмера – от 5 до 50 нм (рис. 5), что в случае подбора оптимального гранулометрического состава обеспе-

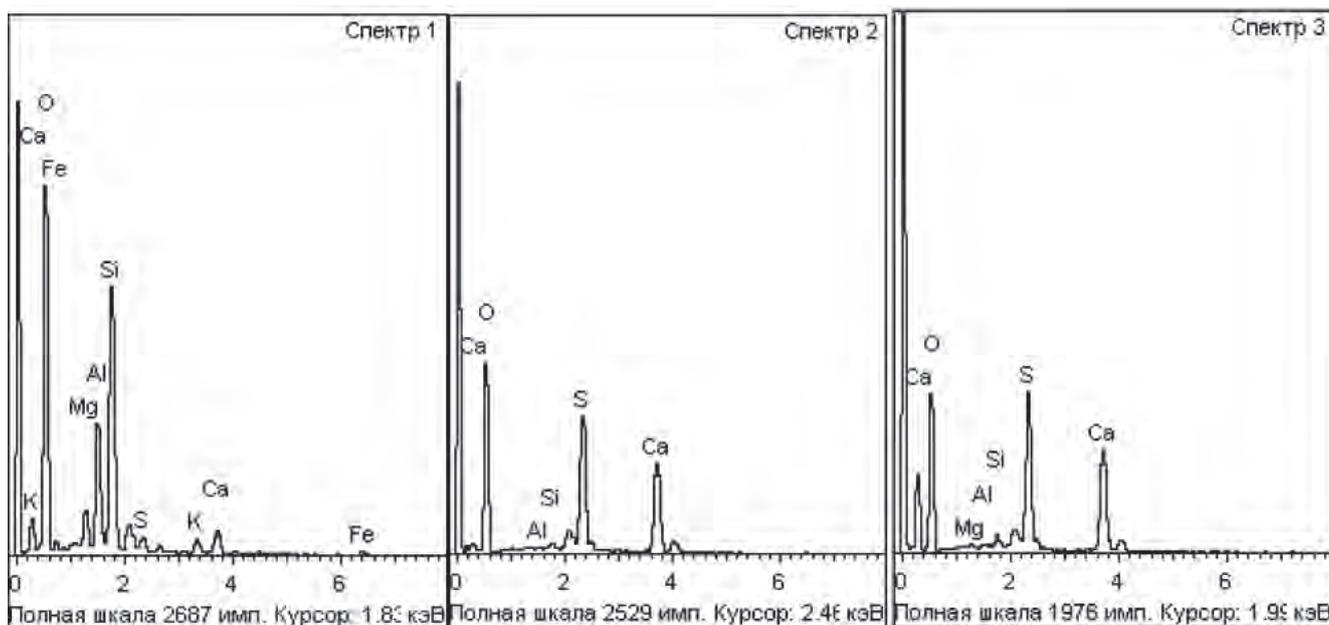


Рис. 3. Зарегистрированные спектры образца гипсового дисперсно-армированного камня
 Fig. 3. Registered spectra of dispersed-reinforced gypsum

Таблица 2
 Table 2

Химический состав дисперсно-армированного гипсового камня, мас. %
 Chemical composition of dispersed-reinforced gypsum, in weight percent

Спектр	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Спектр 1	59,26	2,67	8,39	19,78	1,61	1,88	4,01	2,4
Спектр 2	62,67	–	0,19	0,66	15,9	–	20,58	–
Спектр 3	57,81	0,32	0,26	1,02	16,81	–	23,77	–

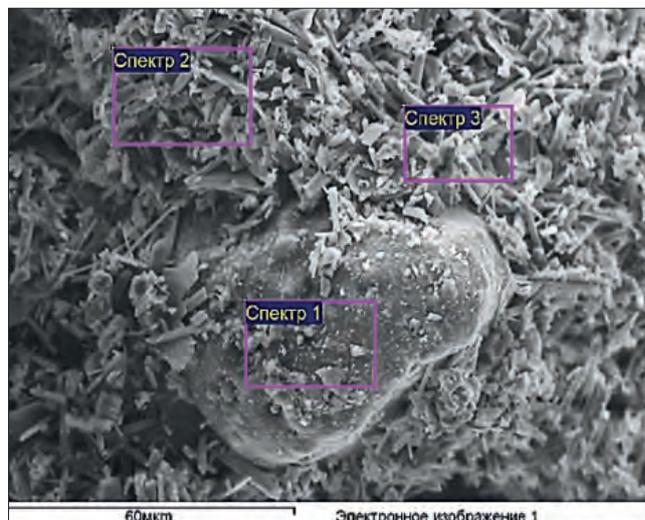
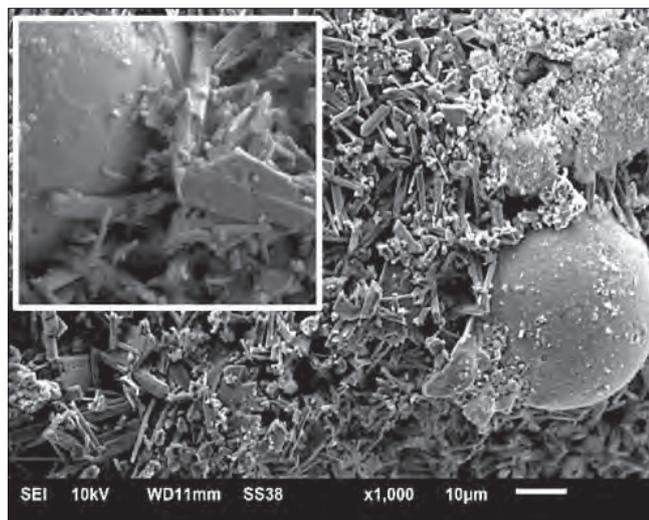


Рис. 4. Микроструктура гипсового дисперсно-армированного камня
 Fig. 4. Microstructure of dispersion-reinforced gypsum

чивает дополнительное заполнение пустот и получение плотной упаковки частиц на разных уровнях пространственного масштаба, а следовательно, повышение плотности гипсовой дисперсной композиции.

С позиций физикохимии установлено, что алюмосиликатный компонент влияет на процесс структуро-

образования гипсового модифицированного камня. Так, введение дисперсного алюмосиликата ускоряет схватывание гипсового теста (начало схватывания наступает в среднем на 2 мин раньше), что обусловлено ролью алюмосиликатной добавки в процессе кристаллизации модифицированной гипсовой структуры.



Рис. 5. ПЭМ изображения образца гипсового модифицированного камня

Fig. 5. Transmission electron microscopy of modified gypsum

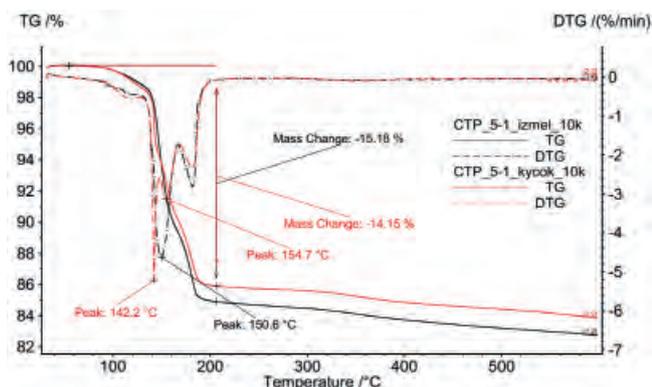
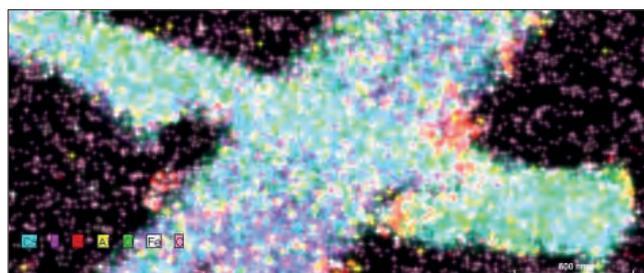


Рис. 6. Зависимость потери массы контрольного состава

Fig. 6. DTG and TG of gypsum control

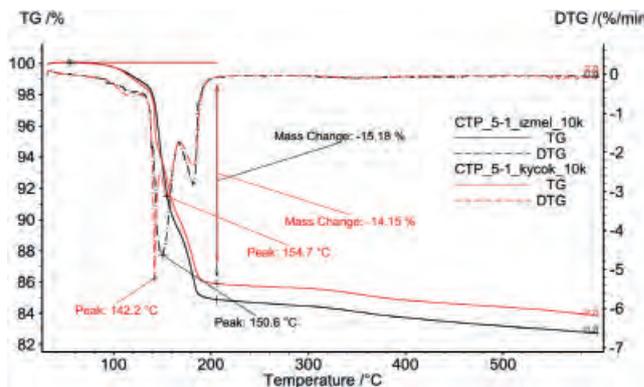


Рис. 7. Зависимость потери массы модифицированного состава гипсового камня

Fig. 7. DTG and TG of modified gypsum

Причем замечено, что наиболее активно кристаллизация дигидрата протекает на поверхности наиболее дисперсных алюмосиликатных сфер. Это подтверждается данными проведенного микроструктурного анализа (рис. 3, 4). Сравнительный анализ микроструктуры (рис. 3, 4) демонстрирует образование контактной зоны между вяжущей матрицей и микро- и наноразмерными сфероидальными алюмосиликатными частицами в структуре синтезируемой гипсовой композиции.

Таким образом, по результатам проведенного спектрального (табл. 2) и микроструктурного (рис. 4) анализа камня контрольного и модифицированного составов подтверждается формирование кристаллов на поверхности зерен гипса и в зонах контакта частиц разного размера между собой, а также контактов между частицами дигидрата и алюмосиликатных сфер с формированием в дальнейшем высокопрочной мелкокристаллической структуры дисперсно-армированного камня. Представленные данные просвечивающей электронной микроскопии подтверждают наномасштабное структурирование модифицированной композиции (рис. 5).

Проведенные ДСК и ТГА позволили установить разницу температурных диапазонов наблюдаемых экзоэффектов для образцов чистого и модифицированного гипсового камня, выявляющих особенности кристаллической структуры последнего (рис. 6, 7), которые обуславливают изменение его физико-механических характеристик.

Таблица 3
Table 3

Основные характеристики сухой строительной смеси
Indicators of dry building mix

Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %
Составы без пластификатора		
10,8	1096	29,2
11,9	1105	25,5
12,5	1111	25,5
Составы с пластификатором Фригласт		
16,5	1205	26,1
17,9	1270	22,8
19,8	1295	22,9

На кривой ДТГ три пика потери массы с максимумом в точках 121, 150 и 180°C. В диапазоне 80–125°C происходит потеря адсорбционной воды, в диапазоне 125–200°C потеря химически связанной воды.

В целях регулирования технологических характеристик сырьевых смесей на основе гипсового вяжущего и алюмосиликатного компонента исследовалось влияние добавки гиперпластификатора на свойства модифицированного гипсового камня. Оптимальное содержание пластифицирующей добавки – Фрипласта составило 1% от массы гипсового вяжущего (табл. 3).

Удельная прочность композиции с оптимальной рецептурой составила 15,3 МПа, что на 65% выше, чем у контрольного состава.

Таким образом, повышение прочности и средней плотности гипсового камня возможно за счет

управления его внутренней структурой и повышения плотности за счет дисперсного алюмосиликатного компонента ЗШО ТЭС и добавки извести. В присутствии извести высокодисперсный алюмосиликатный модификатор, содержащий аморфную составляющую, образует дополнительные структурные связи на всех уровнях пространственного масштаба. Дисперсное нано- и микроармирование способствует дополнительному упрочнению и уплотнению структуры модифицированного гипсового камня.

Выполненный расчет экономической эффективности обосновал целесообразность применения алюмосиликатного дисперсного модификатора, выделенного из золошлакового отвального отхода ТЭС, в производстве сухих строительных смесей.

Список литературы

1. Худякова Л.И., Залуцкий А.В., Палеев П.Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // *XXI век. Техносферная безопасность*. 2019. Т. 4. № 3 (15). С. 375–391. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391
2. Makul N., Fediuk R., Amran M., Petropavlovskaya V., Sulman M. Utilization of biomass to ash: An overview of the potential resources for alternative energy. *Materials*. 2021. Vol. 14 (21). 6482. DOI: 10.3390/ma14216482
3. Михайлов В.Г., Бугрова С.М., Якунина Ю.С., Муромцева А.К., Михайлова Я.С. Исследование основных показателей горно-эколого-экономической системы // *Уголь*. 2019. № 9 (1122). С. 106–111. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-9-106-111
4. Целюк Д.И., Целюк И.Н. Экологические проблемы вторичного использования золошлаковых отходов // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2019. № 2 (165). С. 73–78.
5. Абдрахимова Е.С. Образование золы легкой фракции и использование ее в производстве плиток для полов // *Уголь*. 2019. № 11 (1124). С. 64–66. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-64-66
6. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 4. С. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077
7. Красный Б.Л., Иконников К.И., Лемешев Д.О., Сизова А.С. Летучая зола как техногенное сырье для получения огнеупорных и изоляционных керамических материалов // *Стекло и керамика*. 2021. № 2. С. 9–19.
8. Singh M., Siddique R., Singh J. Coal fly ash. *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from*

References

1. Khudyakova L.I., Zalutskiy A.V., Paleev P.L. Use of ash and slag waste of thermal power plants. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2019. Vol. 4. No. 3 (15), pp. 375–391. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391 (In Russian).
2. Makul N., Fediuk R., Amran M., Petropavlovskaya V., Sulman M. Utilization of biomass to ash: An overview of the potential resources for alternative energy. *Materials*. 2021. Vol. 14 (21). 6482. DOI:10.3390/ma14216482
3. Mikhailov V.G., Bugrova S.M., Yakunina Ju.S., Muromtseva A.K., Mikhailova Ya.S. Study of the main indicators of the mining eco-economic system. *Ugol*. 2019. No. 9(1122), pp. 106–111. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-9-106-111 (In Russian).
4. Tselyuk D.I., Tselyuk I.N. Ecological problems of the recycling of ash and slag waste from thermal power plants. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2019. No. 2 (165), pp. 73–78. (In Russian).
5. Abdrakhimova E.S. Formation of light fraction ash and its use in the production of floor tiles. *Ugol*. 2019. No. 11(1124), pp. 64–66. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-64-66 (In Russian).
6. Pichugin E.A. Analytical review of experience gained in the Russian Federation in involving ash and slag waste from thermal power plants in economic circulation. *Problemy regional'noj ekologii*. 2019. No. 4, pp. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077 (In Russian).
7. Krasny B.L., Ikonnikov K.I., Lemeshev D.O., Sizova A.S. Fly ash as a technogenic raw material for the production of refractory and insulating ceramic materials (review). *Steklo i keramika*. 2021. No. 2, pp. 9–19. (In Russian).
8. Singh M., Siddique R., Singh J. Coal fly ash. *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from*

- Different Sources. Materials, Properties and Applications Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2022, pp. 1–29. DOI: 10.1016/B978-0-12-824050-2.00012-7
9. Nayak D., Abhilash P.P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*. Vol. 10 (6), pp. 2686–2705. 2022. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100143
 10. Win T.T., Wattanapornprom R., Prasittisopin L., Pansuk W., Pheinsusom P. Investigation of fineness and calcium-oxide content in fly ash from ASEAN Region on properties and durability of cement-fly ash system. *Engineering Journal*. 2022. Vol. 26 (5), pp. 77–90, DOI: 10.4186/ej.2022.26.5.77
 11. Делицын Л.М., Кулумбегов Р.В., Рябов Ю.В., Петропавловская В.Б., Сульман М.Г. Перспективный метод утилизации золошлаковых отходов переменного состава на угольных электростанциях // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 9. С. 18–23. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-9-18-23
 12. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Завадько М.Ю., Петропавловский К.С. Применение метаксаолина и золы гидроудаления в безобжиговых гипсовых композитах // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-11-17>
 13. Кудерин М.К., Бабиев К.Д. Алюмосиликатная микросфера в решении задач энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий и сооружений // *Наука и техника Казахстана*. 2019. № 1. С. 94–101.
 14. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 18–23. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-18-23.
 15. Гордина А.Ф., Полянских И.С., Жукова Н.С., Яковлев Г.И. Исследование влияния пуццоланового компонента на структуру и состав модифицированных сульфатных матриц // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 51–58. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58
 16. Гаджиев Ш.А., Делицын Л.М., Кулумбегов Р.В., Попель О.С., Сульман М.Г., Петропавловский К.С., Фирсов С.С. Опыт-промышленные испытания переработки золы угольных ТЭС // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 12. С. 4–9. DOI 10.18412/1816-0395-2022-12-4-9
 17. Делицын Л.М., Рябов Ю.В., Кулумбегов Р.В., Лавриненко А.А., Сульман М.Г. Влияние флотационных реагентов на извлечение углерода из золы угольных ТЭС // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 2. С. 14–19. DOI 10.18412/1816-0395-2022-2-14-19
 9. Nayak D., Abhilash P.P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*. Vol. 10 (6), pp. 2686–2705. 2022. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100143
 10. Win T.T., Wattanapornprom R., Prasittisopin L., Pansuk W., Pheinsusom P. Investigation of fineness and calcium-oxide content in fly ash from ASEAN Region on properties and durability of cement-fly ash system. *Engineering Journal*. 2022. Vol. 26 (5), pp. 77–90, DOI: 10.4186/ej.2022.26.5.77
 11. Delitsyn L., Kulumbegov R., Ryabov Yu., Petro-pavlovskaya V., Sulman M. A promising method of utilization of ash and slag waste of variable composition at coal-fired power plants. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021. Vol. 25. No. 9, pp. 18–23. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-9-18-23 (In Russian).
 12. Petro-pavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Zavadko M.Yu., Petro-pavlovsky K.S. Application of metakaolin and wet ash discharge in non-fired gypsum composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 11–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-11-17>
 13. Kuderin M.K., Babiyeв K.D. Aluminosilicate micro-sphere in solving the tasks of energy saving and enhancing the energy efficiency of buildings and structures. *Nauka i tekhnika Kazahstana*. 2019. No. 1, pp. 94-101. (In Russian).
 14. Petro-pavlovskaya V.B. The use of mineral ultra-disperse modifiers on the basis of industrial wastes in gypsum composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 18–23. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-18-23.
 15. Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Zhukova N.S., Yakovlev G.I. Pozzolanic constituent impact on structure and properties of modified sulfate-based composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 8, pp. 51–58. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58
 16. Gadzhiev SH.A., Delitsyn L.M., Kulumbegov R.V., Popel O.S., Sulman M.G., Petro-pavlovsky K.S., Firsov S.S. Pilot plant for the processing of ash from coal-steam power plants. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2022. Vol. 26. No.12, pp. 4–9. (In Russian). DOI 10.18412/1816-0395-2022-12-4-9
 17. Delitsyn L.M., Ryabov Yu.V., Kulumbegov R.V., Lavrinenko A.A., Sulman M.G. Flotation agents impact on the carbon capture from ash of coal-steam plants. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2022. Vol. 26. No. 2, pp. 14–19. (In Russian). DOI 10.18412/1816-0395-2022-2-14-19

Ю.В. ШТЕФАН¹, канд. техн. наук (shtephan_y_v@mail.ru);

Б.А. БОНДАРЕВ², д-р техн. наук (Insp-48@mail.ru)

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), (125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)

² Липецкий государственный технический университет (398000, г. Липецк, ул. Московская, 30)

Жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги и управление рисками на стадиях проектирования и изысканий

Управление жизненным циклом продукции все прочнее входит в практику проектирования и строительства, и лесовозная автомобильная дорога здесь не будет исключением. Развитие подходов к управлению рисками в дорожном строительстве заставляет заказчиков предъявлять все новые и новые требования к процессам проектирования и изысканий для накопления информации о будущем объекте строительства. Задача, поставленная в работе по управлению жизненным циклом лесовозной автомобильной дороги на основе анализа рисков и управления качеством, решается всесторонним анализом как самих этапов жизненного цикла, так и воздействиями на риски на каждой из этих стадий. Визуализация жизненного цикла автомобильной дороги с предполагаемыми на основе экспертных оценок современных вызовов и опасностей российских реалий выполнена построением «петли качества», при помощи которой удобно наблюдать не только этапы, но и предлагать показатели качества, выявлять риски каждого этапа жизненного цикла и управлять рисками путем анализа информационных потоков. Обобщены актуальные на сегодняшний день риски для двух стадий жизненного цикла – проектирования и изыскания перед возведением лесовозной автомобильной дороги и предложены методы их компенсации и управления через разработку системы нормирования рисков.

Ключевые слова: жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги, оценка рисков, управление техническими рисками.

Для цитирования: Штефан Ю.В., Бондарев Б.А. Жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги и управление рисками на стадиях проектирования и изысканий // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 80–88.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-80-88>

Yu.V. SHTEPHAN¹, Candidate of Sciences (Engineering) (shtephan_y_v@mail.ru);

B.A. BONDAREV², Doctor of Sciences (Engineering) (Insp-48@mail.ru)

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), (64, Leningradsky Prospect, Moscow, 125319, Russian Federation)

² Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398000, Russian Federation)

Life Cycle of a Logging Road and Risk Management at the Design and Survey Stages

Product lifecycle management is more and more firmly established in the practice of design and construction, and the logging road will not be an exception here. The development of approaches to risk management in road construction forces customers to make more and more new requirements for the design and survey processes in order to accumulate information about the future construction object. The task set in the work on managing the life cycle of a logging road based on risk analysis and quality management is solved by a comprehensive analysis of both the life cycle stages themselves and the impacts on risks at each of these stages. Visualization of the life cycle of a highway with the expected on the basis of expert assessments of modern challenges and dangers of Russian realities is carried out by building a “quality loop”, with which it is convenient to observe not only the stages and offer quality indicators, identify the risks of each stage of the life cycle and manage risks by analyzing information flows. The current risks for two stages of the life cycle – design and surveys before the construction of a logging road are summarized, and methods for their compensation and management through the development of a risk rating system are proposed.

Keywords: life cycle of a logging road, risk assessment, technical risk management.

For citation: Shtephan Yu.V., Bondarev V.A. Life cycle of a logging road and risk management at the design and survey stages. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 80–88. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-80-88>

Оценка рисков – важная составляющая современного мира применительно и к лесовозным дорогам в том числе [1, 2]. Авторы рассматривают жизненный цикл объекта строительства и обобщают накопленный опыт российских ученых, предлагают методы управления рисками для первых нескольких стадий жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги.

В настоящее время нерешенными остаются многие вопросы реализации принципов воздействия на

риски и знания о них весьма разрозненны. Продолжается реализация стратегии развития лесовозных автомобильных дорог, которые могут применяться и для передвижения военной техники, что в условиях нынешних реалий налагает свои требования на несущую способность лесовозной автомобильной дороги и не может не учитываться при анализе рисков.

Актуальность. Для временных лесовозных дорог, испытывающих повышенные нагрузки от больше-

грузных автомобилей, лесовозов и в перспективе военной гусеничной и колесной техники, оценка рисков на всех стадиях жизненного цикла для управления им является сложной и актуальной задачей, которую ставит перед научным сообществом современная практика. Даже временные лесовозные дороги могут превратиться в дороги местного значения и военные, но в период паводков они до сих пор превращаются в непроходимые ни для человека, ни для вездеходной техники пути.

Актуальность исследований в области управления рисками на всех стадиях жизненного цикла продиктована необходимостью развития лесовозных дорог для военных и противопожарных целей, а затем переустройства их под автодороги общего пользования. Разрозненные источники для последующего анализа рисков и отсутствие закрепленного понятия жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги требуют систематизации знаний об источниках опасностей для конкретного объекта.

Последние изменения в актуальной редакции Лесного кодекса от декабря 2022 г. (Федеральный закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ «Лесной кодекс Российской Федерации» в редакции от 29.12.2022 г. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения 08.03.2023)) требуют относить лесовозные автомобильные дороги, как и другие линейные сооружения, не связанные с созданием лесной инфраструктуры, к объектам капитального строительства. Предельные параметры таких сооружений устанавливаются с учетом постановлений правительства и оценки рисков комплексного воздействия на окружающую среду со стороны отходов, нарушений технологии строительства лесовозных автодорог, вероятностей появления на дорогах военной, вездеходной и другой тяжелой техники, влияющих на их работоспособность и долговечность. Они, в свою очередь, характеризуются нарушениями длительности этапа жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги, снижением скорости возки, увеличением выбросов отработавших газов лесовозов, потерей сцепления колеса с покрытием, повышением затрат на эксплуатацию дороги и, конечно же, сроком службы. Следует учитывать и специфические риски, например при использовании инновационных технологий или использовании отходов промышленности при их строительстве, заключающиеся в оценке стойкости инертных материалов против всех видов самораспадов шлаков и сложности их переработки, а также риски повышения сопротивления качению колеса лесовоза на увлажненном глинистом грунте. Здесь помогут скомпенсировать такие риски: опыт применения литого доменного шлака в смежной отрасли – строительстве автомобильных дорог общего пользования в Липецком регионе (Штефан Ю.В., Бондарев Б.А., Прозорова Л.А. Комплексное управление каче-

ством щебеночно-мастичного асфальтобетона на шлаковом щебне: Монография. Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2016. 258 с.); использование не склонных к самораспаду при выдержке в открытых отвалах конвертерных шлаков с естественными или искусственно ускоряющими условиями протекания химических процессов. Согласно такой технологии литой доменный шлак или выдержанный в течение 1–2 лет в открытых отвалах конвертерный шлак перемешивается с грунтом в присутствии специальных добавок, что ведет к полному исключению влияния процессов самораспада на эксплуатационные свойства оснований дорог. Согласно СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» допускается применение шлакового щебня и смесей на его основе и для строительства оснований лесовозных дорог, и для покрытий капитальных дорог, но здесь следует учитывать риски появления лещадных и игловатых частиц щебня. Такими рисками приходится управлять на предыдущей стадии жизненного цикла дороги – стадии подготовки сырьевых инертных материалов за счет применения в основном импортных дробилок, грохотов и кубикаторов [3], что в современных условиях будет недостижимым, а значит, необходим поиск новых методов компенсации данного риска.

Цель исследований. Уточнение понятия жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги и анализ рисков на стадиях проектирования и изысканий. Решение задачи управления рисками следует начинать с того, что такое риск, откуда он появился и как им управляют. Понимание источников опасностей позволит правильно классифицировать риски и предпринимать действия по реагированию на них.

Менеджмент рисков в смежных областях деятельности. Вопросы управления рисками в различных областях промышленности вызваны множеством современных требований науки, техники и рынка: техническое регулирование, широкое внедрение риск-ориентированного мышления при разработке и внедрении систем менеджмента качества на предприятиях, а также требованиями инвесторов при разработке бизнес-планов. Менеджмент риска вошел во все уровни управления предприятиями, от маркетингового анализа до контроля качества готовой продукции, от разработки новой продукции до ее утилизации.

Риски возникновения аварийных ситуаций на лесовозном транспорте оказывают значительное влияние на обстановку в промышленности лесозаготовок в РФ. Поэтому эффективная работа любой лесовозной автомобильной дороги, а особенно магистральной, определяется необходимым уровнем технико-эксплуатационного состояния, обеспечивающего надежную и безопасную работу инфраструктуры леса и лесозаготовки в частности, идеализацию технических возможностей автотранспор-

та и специализированных транспортных средств при оптимальных дорожных затратах. Для обеспечения круглогодичного, бесперебойного, безопасного и удобного движения по автодорогам с заданными скоростями (согласно утвержденному владельцем дороги суточному графику) и нагрузками необходимо уже на стадии разработки бизнес-плана лесовозной автомобильной дороги перед инвесторами ставить задачу финансирования работ по установлению допустимого уровня риска как для конкретной категории лесовозной дороги, так и для региона ее строительства. Ограничение нагрузки на дорожное покрытие, как и режим движения транспорта и ограничения доступа стороннего транспорта во время вывозки леса, согласно упомянутому выше СП 288.1325800.2016, устанавливаются также владельцем дороги.

Машины и оборудование. Использовать опыт управления рисками в машиностроении при проектировании новых объектов и модернизации существующих производств важно и для лесовозных автомобильных дорог, так как от качественной и бесперебойной работы машин и механизмов зависит предотвращение аварий в любой отрасли промышленности. Так, при использовании техники в строительстве лесовозных автодорог, удаленных на значительные расстояния от автодорог общего пользования, удобно применять универсальные лесодорожные машины типа грейдеров, желательного отечественного производства для снижения рисков несвоевременных поставок запчастей и увеличения простоев.

Так, риски отсутствия запчастей на импортную технику могут быть сведены к минимуму за счет использования для строительства лесовозной дороги требуемой категории капитальности универсального набора лесодорожных машин: мульчеров, роторов, грейдеров, распределителей порошкообразных материалов и фрез ДС-73 и ДС-74 на базе пневмоколесного трактора со сменным навесным оборудованием Т-158К отечественного производства [2]. Благо здесь есть что показать отечественному производителю уплотнительных машин: кроме гладковальцовых катков подойдут и кулачковые виброкатки с регулируемой амплитудой колебаний, которые подходят для окончательного формирования шероховатого слоя покрытия лесовозной дороги. Однако не все используемые при этом машины можно сегодня заменить отечественными аналогами; такие, как, например, перегружатели асфальтобетонной смеси, реclaimerы для стабилизации грунтов отсутствуют как класс на российском рынке машин [4, 5].

Что же касается производства инертных материалов для устройства лесовозных дорог, то здесь ситуация на рынке еще печальнее. Отсутствие отечественных аналогов дробильно-сортировочного оборудования (ДСО), отсутствие кубикаторов и качественных образцов мобильных ДСО в условиях отсутствия запчастей могут привести к увеличению

стоимости даже таких отходов промышленности, как шлаковый щебень, требующий, как и природные материалы, несколько стадий дробления и грохочения. По мнению многих экспертов, производители спецтехники, в том числе и ДСО, должны в ближайшее время получить шанс лавинообразного роста производства, если хотя бы воспользуются ситуацией и не пустить на рынок китайский импорт [6]. *Однако отечественные производители не торопятся анонсировать выпуск новых линеек на замену ушедших с рынка мировых гигантов, и эти риски надо будет учитывать.* Хочется надеяться, что вспомнят, наконец, и про российские разработки [7], и про арфообразные сита для грохотов (Бондарев Б.А., Штефан Ю.В. и др. Расчет состава асфальтобетонных смесей по системе объемно-функционального проектирования по методологии «SuperPave». Липецк: Кватро Медиа Групп, 2021. 56 с.), специально в угоду технологиям «SuperPave» канувшие в никуда [8].

Для справки. Методология «SuperPave» – система объемно-функционального проектирования по ГОСТ Р 58401.5–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования».

Контрольно-надзорные риски. Современные требования к органам контроля и надзора согласно требованиям Федерального закона от 26.12.2008 № 294-ФЗ «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» также вынуждены применять риск-ориентированный подход. *Риск-ориентированный подход* – это метод организации и осуществления государственного контроля (надзора), при котором выбор интенсивности проведения мероприятий по профилактике нарушений определяется отнесением деятельности юридического лица к определенной категории риска либо классу опасности (с учетом тяжести последствий возможного несоблюдения требований, а к определенной категории риска – с учетом вероятности несоблюдения обязательных требований). Методика и правила отнесения юрлиц к определенной категории определяются также Правительством РФ.

Индикаторы риска нарушения обязательных требований разрабатываются и утверждаются федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими функции по выработке и реализации государственной политики и нормативно-правовому регулированию в установленной сфере деятельности (в ред. Федерального закона № 277-ФЗ от 03.07.2016 г.). Этот подход позволяет контролирующим организациям уйти от сплошного контроля, использовать индикаторы риска без привлечения проверяемой стороны, сократить затраты на содержание штата проверяющих контрольно-надзорных органов.

Производители сырья. При проектировании лесовозных дорог способом укрепления грунтов с применением цемента и других порошкообразных вяжущих материалов на базе российского тягача Т-158 следует учитывать риски в области производства цемента, особенно на фоне провозглашенных недавно изменений в структуре Евроцемента, переименованного в холдинг ЦЕМРОС. Эта машина универсальна и подходит для перевозки цемента и порошкообразных отходов ТЭЦ, которые авторы предлагали уже ранее использовать в технологии укрепления глинистых грунтов вместе с щебнем и песком металлургических шлаков при распределении вяжущего (кремнефтористый натрий) в количестве 8–10% от массы жидкого стекла. Комплексное вяжущее включает активатор твердения в составе: содощелочной сплав с содержанием Na_2CO_3 не менее 95% и NaOH не менее 2% по массе, жидкое стекло с модулем 1,7–1,8 и плотностью 1,15–1,25 г/см³. Основной компонент – молотые слабоактивные шлаки черной металлургии.

Для завершения самораспада укрепленного стапельным конверторным шлаком глинистого грунта после стабилизации в течение года несущего слоя лесовозной дороги необходимо повторное выравывание, уплотнение и укатка верхнего слоя дорожной одежды. Для строительства покрытий лесовозных дорог по способу укрепления грунта вяжущими применимы фрезы ДС-73 и ДС-74 на базе пневмоколесного трактора Т-158К для устранения образовавшихся дефектов из-за остаточных процессов самораспада в шлаке на глубину до 250 мм. Хотя, конечно, качество и надежность этих машин значительно уступают импортным аналогам, а значит, риск простоев из-за роста вероятности появления отказов машин, конечно же, будет возрастать.

Основным способом защиты от данного вида рисков является проведение входного контроля поступающих на склад инертных материалов и оборудования и запчастей к нему, а также управление логистикой и сроками поставок. Важным этапом является контроль качества самим производителем, позволяющий свести к остаточной величине риска на уровне 5%, но который у потребителя увеличивается до 10%. Это нормальная мировая практика. И согласование планов контроля одного с другим позволяют свести к минимуму негативные последствия от вероятности поставки некачественной продукции, не обременяя никого увеличением себестоимости за счет контрольных операций.

Риски несоблюдения технологии. При возведении лежневых дорог кроме природных опасностей существует риск нарушений сроков безопасной эксплуатации таких дорог в межсезонье. Такие риски невозможно компенсировать на стадии эксплуатации, они должны быть просчитаны ранее на стадии проектирования и изысканий. Прочность конструк-

ции обеспечивается проволочной увязкой сланей, поперечных бревен и продольных хлыстов, уложенных поверх бревен. На этом этапе строительства обязательно углубление слани для полного прилегания поперечного наката к грунту. Это позволяет равномерно распределить нагрузки от подвижного состава по ширине дороги. Небрежное выполнение этой операции ведет к поломке поперечного провисающего бревна, что характерно для зимнего периода строительства, когда слань опирается на замерзший грунт. Двухпорный поперечный настил не выдерживает нагрузки от транспорта. А весной, когда важно успеть вывезти заготовленный лес с зимней делянки, увеличивается опасность попадания нагруженного лесом автомобиля в вытаявшую, фактически заранее подготовленную строителями ловушку [2].

В отличие от жесткой конструкции сланей, работающих по принципу понтонного моста с заданной скоростью осадки, обусловленной скоростью фильтрации воды через торфяную подушку, эта конструкция может применяться совместно с геосетками, которые хорошо зарекомендовали себя с нежесткими дорожными одеждами при строительстве лесовозных дорог. Благодаря использованию геосеток значительно повышаются сроки службы лесовозной дороги, особенно в осенний и весенний периоды паводков. Но здесь возникает вероятность отсутствия на отечественном рынке геосеток чисто российского производства, а значит, риск ухода с рынка этих производителей нельзя сбрасывать со счетов.

Сравнение строительства с использованием сланей и традиционных технологий укрепления грунтов из отходов промышленности показывает упрощение технологии, снижение рисков ее нарушения, сокращение строительной техники и использование его для переустройства для военных, а затем дорог общего пользования с капитальным покрытием. Это невозможно в случае использования сланей, их надо удалять во избежание роста вероятности гниения в увлажненных слоях глинистого грунта, поскольку тяжесть последствий этого риска будет высокой.

Способом компенсации риска нарушения технологии возведения конструкций на лесовозных дорогах может выступать страхование рисков ответственности производителей работ по аналогии с системой саморегулирования, которая на сегодняшний день вызывает множество нареканий со стороны СРО. Непомерно высокие взносы, по их мнению, членов союзов проектировщиков и изыскателей встречаются с нареканиями самих организаций, поскольку в случае возникновения судебных разбирательств их будет недостаточно даже для покрытия судебных издержек. В страховом деле накоплен значительный опыт оценки рисков: военные, политические, объективные, субъективные и технические [9].

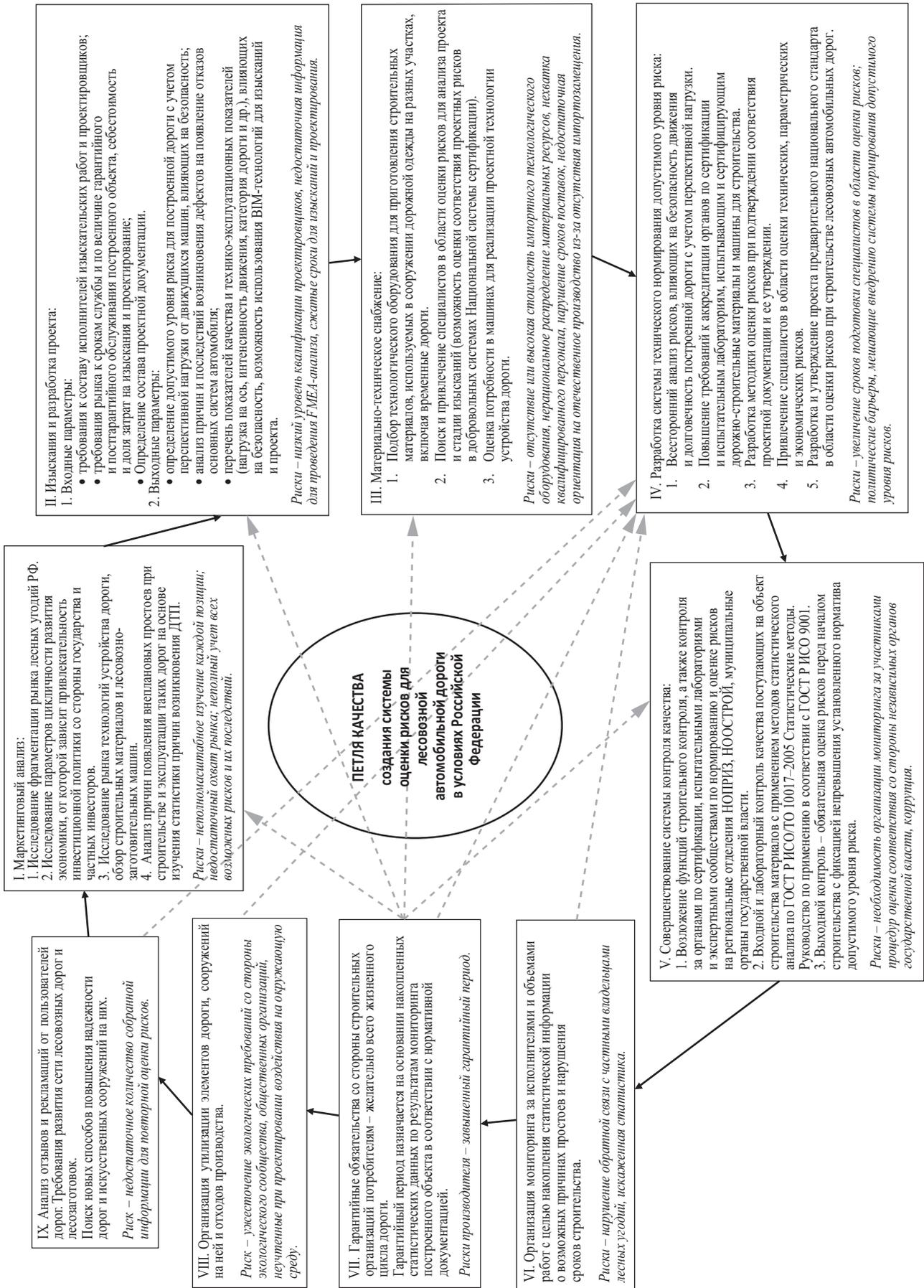


Рис. 1. Жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги с оценкой рисков каждой стадии: сплошные стрелки – направление этапов; пунктирные – обратная связь (информационные потоки)
Fig. 1. The life cycle of a logging road with an assessment of the risks of each stage: solid arrows – the direction of the stages, dotted arrows – feedback (information flows)

Страхование рисков. Технические риски могут нанести ущерб имуществу, жизни и здоровью людей, финансовым интересам предприятий вследствие перерыва в производстве и сверхнормативных затрат. Подразделяются по видовому составу основных и оборотных фондов, в которых они проявляются:

- промышленные риски;
- строительные (строительно-монтажные) риски;
- электротехнические риски;
- риски заболевания животных и растений, падежа скота, порчи урожая и т. д.

– транспортные риски (подразумевают страхование средств воздушного, наземного транспорта, страхование КАСКО, грузов, ответственности);

– специальные риски. Подразумевают страхование перевозок особо ценных грузов. Содержание специальных рисков оговаривается в особых условиях договора страхования и может быть включено в объем ответственности страховщика;

– экологические риски, связанные с загрязнением окружающей среды.;

– аномальные риски. Данная группа охватывает риски, которые соответствующие объекты не позволяют отнести к тем или иным видам страхования;

– катастрофические риски. При их наступлении могут принести ущерб страхователю в особо крупных размерах. По международной классификации Организации экономического сотрудничества и развития катастрофические риски подразделяются на эндемические (местные) риски, которые происходят под воздействием метеорологических факторов и условий, и риски, которые происходят под воздействием качества земли (например, эрозия почв).

Понятие жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги

Анализ действующих на сегодняшний день стандартов, а точнее, серии ГОСТов под общим названием «Жизненный цикл продукции», показал, что даже после отмены международного стандарта ИСО 8402–89 «Управление качеством и обеспечение качества. Словарь» остается все так же актуальным графическое изображение петли или спирали качества. Если строить такое схематическое изображение всех последовательных стадий жизненного цикла, как петля качества для лесовозной автомобильной дороги, можно заметить, что жизненный цикл охватывает все стадии, от маркетинга до утилизации, и каждая такая стадия не может существовать без хотя бы одной из них (рис. 1).

Самая важная стадия под номером VII, включающая эксплуатацию лесовозной дороги, в том числе и на этапе гарантийных обязательств, при подходе к управлению проектами на основе жизненного цикла построенного объекта занимает малую долю и лишь реализует предыдущие стадии жизненного



Рис. 2. Процесс риск-менеджмента по ИСО 31000: курсивом – требование ИСО 31000; жирным – ИСО 9001

Fig. 2. ISO 31000 risk management process: italics – ISO 31000 requirement; bold – ISO 9001

цикла, давая информационную обратную связь для них. В свою же очередь, система оценки рисков не может влиять на предыдущие стадии жизненного цикла, которые к тому моменту уже будут реализованы, но это влияние будет на следующем витке развития, почему и называют часто эту схему именно «петля качества».

Если соединить требования ГОСТ Р ИСО 9001–2015 «Системы менеджмента качества. Требования» и ГОСТ Р ИСО 31000–2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство», то процесс риска менеджмента можно представить в виде схемы.

На рис. 2 видно, что часть требований стандарта ИСО 31000 в стандарте ИСО 9001 подразумевается, хотя прямой ссылки в нем не приводится. Следовательно, совместное использование двух указанных стандартов позволяет организации эффективно управлять рисками, преобразуя риски в возможности (положительные последствия неопределенности) и снижая самый важный источник рисков – неопределенность. Эта неопределенность и является определяющим влиянием на риски (негативные последствия), которая выражается в позитивном или негативном ее выражении, согласно п. 3.7.9 ГОСТ Р ИСО 9000–2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь». Из этого следует, что «неопределенность» является состоянием, связанным с недостатком информации, понимания или знания о событии, его последствиях или вероятности. Риск часто определяют по отношению к потенциальным событиям и их последствиям или к их комбинации. Риск часто выражается в терминах комбинации последствий события и связанных с ними вероятностей возникновения.

Слово «риск» иногда используется в тех случаях, когда существует возможность только негативных последствий.

Управление рисками проектных организаций. Проектные организации, как правило, имеют внедренную и сертифицированную систему менеджмента качества на соответствие стандартам ИСО 9001. В рамках процедур оценки соответствия органы по сертификации требуют с них разработку ключевых индикаторов риска и фиксацию фактов управления рисками через задание пороговых значений – так называемых триггеров риска, которые требуется постоянно переоценивать в зависимости от обстоятельств, что делает систему менеджмента качества крайне обременительной для самой компании [10]. Система ключевых индикаторов рисков разрабатывается в зависимости от того, какие риски были идентифицированы и утверждены к управлению в системе управления рисками организации на основании ее аппетита к риску. Для каждого типа рисков (в идеальной ситуации – для каждого конкретного риска в карте рисков организации) необходимо разработать и утвердить перечень ключевых индикаторов: для операционного риска это будут свои индикаторы, для коррупционного риска – свои; финансовые и кредитные риски также обладают собственными риск-индикаторами. Важно, чтобы риск-индикаторы были измеримыми количественно – это обязательное условие для того, чтобы можно было наладить их мониторинг и контроль.

Необходимо иметь в виду, что каждый риск может характеризоваться многими факторами и соответственно многими индикаторами риска. В итоге в рамках системы управления рисками проектной деятельности можно получить десятки, сотни или даже тысячи риск-индикаторов. Отслеживание такого количества показателей вручную может быть весьма затруднено, поэтому логичным представляется автоматически получать индикаторы риска, к примеру из учетных (или прочих операционных) информационных систем организации, и реализовать некий механизм на основе систем автоматизации управления рисками и машинного обучения [11], который будет пересчитывать вероятность реализации рисков в зависимости от значения соответствующих ключевых индикаторов риска. И здесь уже предлагаются различные виды программного обеспечения для создания систем автоматизированного управления рисками, что, конечно, будет не всем проектировщикам по карману, так же как внедрение BIM-технологий при проектировании и изысканиях. Их несомненным преимуществом является возможность выявления ошибок информационного моделирования на более ранних стадиях жизненного цикла проектируемого объекта, а недостатком – высокая стоимость и сроки проектирования, как и любые другие системы САПР и ГИС [12].

Выводы

В технике строительства лесовозных автомобильных дорог накоплен определенный опыт управления рисками, пусть и не столь большой, как в дорожном строительстве, где есть уже и нормативный документ (ГОСТ Р 58137–2018 «Дороги автомобильные общего пользования. Руководство по оценке риска в течение жизненного цикла») по нормированию величины допустимого риска [13].

Меры воздействия на риск и его снижение определены пока в смежных отраслях народного хозяйства, в том числе и в нормативных документах. Для лесовозных автомобильных дорог ГОСТ Р 58137 также может быть применим риск-менеджерами проектных организаций, в том числе и на этапе изысканий, предшествующих проектированию новой или реконструкции существующей лесовозной дороги.

Учеными разработаны и предложены для практического использования формулы для расчетов степени рисков и меры по их предупреждению [14]. Остается только риск-менеджерам научить искать информацию, разбросанную по разным областям знаний.

В результате анализа рисков имеется возможность их предупреждения или снижения до допустимого уровня.

Анализ рисков на стадии проектирования лесовозных автодорог позволит ими управлять по критериям оценки рисков, определяемым самими проектными организациями, а в последующем свести их к минимуму. Но здесь нужны грамотные и опытные риск-менеджеры в управлении проектной деятельностью [15].

При разработке системы нормирования показателей допустимого риска по аналогии с дорожным строительством [16], банковским делом [17], страхованием и др. контроль качества выполнения проектно-изыскательских работ при строительстве лесовозных автодорог поможет снижать риски до допустимого уровня.

Снижение рисков, в свою очередь, при эксплуатации лесовозных автодорог позволяет снизить вероятные остановки в процессе строительства, понизить аварийность на лесовозных дорогах, повысить их надежность, предусмотреть другие критические для их состояния события.

Систематический анализ ситуации с возможным появлением рисков в каждой отрасли позволяет управлять рисками комплексно, не допускать сокращения жизненного цикла дороги на стадии эксплуатации и гарантийного периода, поддерживая лесозаготовки на должном уровне.

Таким образом, установлены основные источники опасностей и возможности для проведения анализа рисков при проектировании и изысканиях, предшествующих строительству лесовозных автомобильных дорог, предложен подход к управлению рисками на основе жизненного цикла построенного объекта. В качестве мер, компенсирующих риски,

предложены: использование отходов промышленности при строительстве лесовозных дорог, повышающее их долговечность; разработка системы нормирования и оценки уровня рисков проектов на завершающей стадии изысканий при приемке проектной документации; также возможно использование страхования ответственности исполнителя работ по реализации разработанного проекта на ста-

дии гарантийного и постгарантийного обслуживания при эксплуатации дороги. Но этот последний пункт будет рассмотрен авторами в последующих работах. Предлагаемая система оценки проектных рисков позволит своевременно выявлять возможные несоответствия проекта и вовремя их устранить, не передавая его на следующую стадию; развивать сеть лесовозных автодорог.

Список литературы

1. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А., Янковский Л.В. Укрепление глинистых грунтов временных лесовозных дорог отходами промышленности и металлургическими шлаками // *Строительные материалы*. 2020. № 04–05. С. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89>
2. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А. Управление рисками в требованиях стандартов ИСО применительно к лесовозным дорогам // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2020. № 1 (45). С. 85–97. DOI: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.45.1.007>
3. Ульсен К., Ценг Э., Ангуло С.Ч., Ландманн М., Контессотто Р., Балбо Х.Т., Кан Э. Свойства заполнителей для бетона, полученных на щековых и ударных дробилках вторичным дроблением // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Т. 8. № 1. С. 494–502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.008>
4. Чанг Дж.К., Моханрадж К., Стоун У.А., Ош Д.Дж., Галливан В.Л. Использование интеллектуальных технологий уплотнения и термического профилирования для улучшения качества строительства асфальтобетонного покрытия: пример из практики // *Transportation Research Record*. 2018. No. 2672 (26). С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118758285>
5. Цзяо С, Фэн Ч., Ван Ш., Бибусси М.В., Ли С. Корреляция между интеллектуальным индексом уплотнения и степенью уплотнения асфальтового покрытия // *International Conference on Smart Transportation and City Engineering 2021*. Чунцин (Китай). 2021. № 12050. С. 22–30. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.1117/12.2613891>
6. Астапов А. Русский бульдозер взял разгон // *Эксперт*. 2022. № 44 (1273). С. 82–87.
7. Сырейщикова Н.В., Гузеев В.И. Риск-менеджмент процесса проектирования и разработки машиностроительной продукции. *Инновационные технологии в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-практической заочной конференции (посвящается 65-летию со дня основания машиностроительного факультета Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ/ULSTU)). Ульяновск, 30 ноября 2022 г. Ульяновск, 2022. С. 200–213.*
8. Бибииков П.Я., Бардовский А.Д., Керопян А.М. Исследование процесса прессовой классификации

References

1. Shtefan Y.V., Bondarev B.A., Yankovskii L.V. On strengthening temporary logging road clay soil by industrial waste and metallurgical slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 80–89. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89>.
2. Shtefan Y.V., Bondarev B.A. Risk management in requirements of the ISO standards in relation to logging roads. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 1 (45), pp. 85–97. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.45.1.007>.
3. Ulsen C., Tseng E., Angulo S.C., Landmann M., Contessotto R., Balbo J. T., Kahn H. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, No. 1, pp. 494–502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.008>.
4. Chang G.K., Mohanraj K., Stone W.A., Oesch D.J., Gallivan V.L. Leveraging intelligent compaction and thermal profiling technologies to improve asphalt pavement construction quality: A case study. *Transportation Research Record*. 2018. No. 2672 (26), pp. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118758285>.
5. Jiao X.L., Feng Z.G., Wang S.J., Biboussi M.W., Li X.J. Correlation between intelligent compaction index and compaction degree of asphalt pavement. *International Conference on Smart Transportation and City Engineering 2021*. Chongqing, China. 2021. Vol. 12050, pp. 22–30. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.1117/12.2613891>.
6. Astapov A. Russian bulldozer took acceleration. *Expert*. 2022. No. 44 (1273), pp. 82–87. (In Russian).
7. Syreishchikova N.V., Guzeev V.I. Risk management of the design and development of mechanical engineering products. *Innovative Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of the International Scientific and Practical Correspondence Conference (dedicated to the 65th anniversary of the founding of Mechanical Engineering Faculty of Ulyanovsk State Technical University (ULSTU))*. Ul'yankovsk. 2022, pp. 200–213.
8. Bibikov P.Y., Bardovskiy A.D., Keropyan A.M. Investigation of press classification process of weak rocks. *Materials Today: Proceedings. International*

- слабых горных пород // *Materials Today: Proceedings. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE*. Sevastopol. 2019. Т. 19. Ч. 5. С. 2552–2554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.207>
9. Мазнева Е.И. Страхования юридических лиц в России. *Страхование в информационном обществе: Материалы межвузовского научно-методического онлайн семинара, Хабаровск–Москва, 25 апреля 2019 г.* Хабаровск–Москва, 2020. С. 41–45.
 10. Петрова В.С., Киселев Э.В. Управление рисками в проектной деятельности организации. *Экономический потенциал студенчества в региональной экономике: Материалы международной научно-практической конференции. Ярославль, 01–30 ноября 2020 г.* С. 290–296.
 11. Гондиа А., Эззельдин М., Эль-Дахахни В. Платформа поддержки принятия решений на основе машинного обучения для прогнозирования последствий строительного травматизма и снижения рисков // *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 2022. Т. 8. № 3. С. 2402–2024. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0001239>
 12. Лоуай Р. М., Баденко В. Л. Интеграция между BIM и ГИС для принятия решений. *BIM in construction & architecture: Материалы V Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 20–22 апреля 2022 г.* С. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2022.003>
 13. Янковский Л.В., Кочетков А.В., Трофименко Ю.А. Методика выбора материала для устройства шероховатых слоев дорожного покрытия // *Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура*. 2015. № 1 (37). С. 99–111.
 14. Столяров В.В., Шеголева Н.В., Кочетков А.В., Задворнов В.Ю. Основные формулы теории риска при суммировании логнормальных законов распределения // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 73–80. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-73-80>
 15. Аль-Саади Н., Норхайатизакун Н. Влияние практики управления рисками на эффективность строительных проектов // *Studies of Applied Economics*. 2021. Т. 39. № 4. С. 1–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.25115/eea.v39i4.4164>
 16. Баранова Т.И. Методическое и организационное обеспечение риск-ориентированного управления предприятиями строительной отрасли. *Современные проблемы менеджмента в строительстве: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 25–26 ноября 2022 года*. С. 162–169.
 17. Козубекова Р. Классификация рисков как ключевой компонент управления банковскими рисками. *XXXIV Международные Плехановские чтения: Сборник статей аспирантов и молодых ученых. На англ. яз. М., 2021*. С. 70–74.
 - Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE. Sevastopol. 2019. Vol. 19. Part 5, pp. 2552–2554. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.207>.
 9. Mazneva E.I. Insurance of legal entities in Russia. *Insurance in the information society: Materials of the interuniversity scientific and methodological online seminar*. Khabarovsk-Moscow. 2020, pp. 41–45. (In Russian).
 10. Petrova V.S., Kiselev E.V. Risk management in the project activities of the organization. *Economic potential of students in the regional economy: Proceedings of the international scientific and practical conference. Yaroslavl. 2021*, pp. 290–296. (In Russian).
 11. Gondia A., Ezzeldin M., El-Dakhkhni W. Machine Learning-Based Decision Support Framework for Construction Injury Severity Prediction and Risk Mitigation. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 2022. Vol. 8, No. 3, pp. 2402–2024. DOI: 10.1061/AJRUA6.0001239
 12. Louay R. M., Badenko V. L. Integration between BIM and GIS for decision-making. *BIM in construction & architecture : Materials of the V International Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg. 2022, pp. 20–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2022.003>.
 13. Yankovskii L. V., Kochetkov A. V., Trofimenko Yu. A. Methodology of choice components for construction of rough pavement layers. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2015. No. 1 (37), pp. 99–111. (In Russian).
 14. Stoliarov V. V., Schegoleva N. V., Kochetkov A. V., Zadornov V. Yu. Basic formulas of risk theory when summed the lognormal distribution law. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2018. № 1–2, pp. 73–80. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-73-80>.
 15. ALSaadi N., Norhayatizakuan N. The Impact of Risk Management Practices on the Performance of Construction Projects. *Studies of Applied Economics*. 2021. Vol. 39. No. 4, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.25115/eea.v39i4.4164>
 16. Baranova T.I. Methodological and organizational support for risk-based management of enterprises in the construction industry. *Modern problems of management in construction: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg. 2022, pp. 162–169. (In Russian).
 17. Kozubekova R. Risk classification as a key component of bank risk management. *XXXIV International Plekhanov Readings: a collection of articles by graduate students and young scientists in English*. Moscow. 2021, pp. 70–74. (In English).

X МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ:
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕХНИКА,
ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ»

В РАМКАХ ВЫСТАВКИ CTT EXPO 2023

24–25
МАЯ 2023



МОСКВА
МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»
ОТЕЛЬ «АКВАРИУМ»

Организатор конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ
АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Генеральный спонсор
конференции



СИНЕРГО

Спонсоры конференции



MALININ
GROUP

Fastcon

Официальная поддержка



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

Генеральные информационные партнеры



www.fc-union.com, info@fc-union.com, +7 (495) 66-55-014, +7 925 57-57-810

12+





Полнокомплектные решения для производства высококачественных преднапряженных железобетонных элементов



Формовочные установки NORDIMPIANTI способны производить широкий ассортимент преднапряженных железобетонных изделий таких, как пустотные плиты перекрытий, пустотные стеновые панели, ригели таврового и двутаврового сечения, столбики для винограда и перемычки, преднапряженные плиты, элементы U-образного сечения, плиты с интегрированными тавровыми ригелями и т.д.

Преднапряженные изделия, произведенные на установках Экструдер, Слипформер, Вибролитьевая формовочная машина фирмы NORDIMPIANTI, демонстрируют множество преимуществ, которые обеспечивают им успех по всему миру.



ГК «МАЛКО» — официальное представительство Nordimpianti в России и странах СНГ
Комплексные поставки оборудования и запчастей для бетонной отрасли

8 800 2346022

www.onnentalo.ru

sales@onnentalo.ru