

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] № 11



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU НОЯБРЬ 2023 г. (819)



Третья всероссийская научная конференция
«Строительное материаловедение:
настоящее и будущее»



!!! Не забудьте подписаться !!!

на журналы издательства

СТРОЙМАТЕРИАЛЫ



www.journal-cm.ru

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

Индекс **70886***



www.journal-hc.ru

ISSN 0044-4472

Индекс **70283***

На электронную версию можно подписаться

- на сайтах журналов

<https://journal-cm.ru/index.php/ru/podpiska-2023>

<https://journal-hc.ru/index.php/ru/podpiska-2023>

Стоимость электронной подписки на 2024 г.

«Строительные материалы»[®] **16800 руб.**

«Жилищное строительство» **15600 руб.**

- на сайтах наших партнеров

elibrary.ru

delpress.ru

www.ivis.ru

www.rucont.ru

Оформить подписку в редакции можно с любого месяца на любой период

Необходимо составить заявку в произвольной форме с указанием названия организации, юридического и почтового адреса и отправить на e-mail: mail@rifsm.ru или rifsm@mail.ru

Оставайтесь с нами!

* Индексы по объединенному каталогу «Пресса России» <https://www.pressa-rf.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

Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 11

Основан в 1955 г.

(819) Ноябрь 2023 г.

Тел.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Огнезащита строительных материалов и конструкций

С.В. ФЕДОСОВ, А.А. ЛАЗАРЕВ, Д.Е. ЦВЕТКОВ, В.Г. КОТЛОВ, А.Ю. КОМЛЕВ

Оценка качества пропитки древесины неорганическими антипиренами при автоклавировании..... 5

Ю.Н. КОВАЛЬ, А.С. АНДРЕЕВ, Н.З. АГАФОНОВА

Анализ применения огнезащитной композиции для деревянных конструкций..... 10

М.Г. БРУЯКО, П.А. ЛИПКА, М.С. КАЛИНИНА

Теплоизоляционные изделия на основе модифицированного пенополиуретана с огнезащитным покрытием 14

Современные бетоны

В.Г. СОЛОВЬЕВ, Е.В. МАТЮШИН, Л.И. ЕФИШОВ

Влияние вида и объемного содержания стальной фибры на прочность сверхвысокопрочного сталефибробетона при сжатии..... 20

С.С. КАПРИЕЛОВ, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД, В.И. ТРАВУШ, Н.И. КАРПЕНКО, С.Б. КРЫЛОВ

Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени 28

ЧОНГ ЧЫК НГУЕН, ВАН ЛАМ ТАНГ, Б.И. БУЛГАКОВ

Определение адиабатической температуры в твердеющем бетоне по разным стандартам 39

А.М. БАХРАХ, О.А. ЛАРСЕН, С.В. САМЧЕНКО

Влияние количества токопроводящего компонента на удельное электрическое сопротивление мелкозернистого электропроводного бетона 46

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

Геотехническая технология строительства инженерных сооружений на структурно-неустойчивых склонах 52

Отходы в производстве строительных материалов

С.В. САМЧЕНКО, М.Г. БРУЯКО, А.М. ЕРГЕНЯН, В.А. ШВЕЦОВА

Строительный композит на основе гипсового вяжущего и гидрофобизированного борщевика Сосновского 56

ТАНГ ВАН ЛАМ, ФАМ ДЫК ЛЫОНГ, НГУЕН БА БИНЬ, Б.И. БУЛГАКОВ, С.И. БАЖЕНОВА

Газобетоны на геоплимерном вяжущем из техногенных отходов 63

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
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 11

Founded in 1955 (819) November 2023

Tel.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Fire protection of building materials and structures

- S.V. FEDOSOV, A.A. LAZAREV, D.E. CVETKOV, V.G. KOTLOV, A.Yu. KOMLEV
Evaluation of the Quality of Wood Impregnation with Inorganic Fire Retardants During Autoclaving. 5
- Yu.N. KOVAL, A.S. ANDREEV, N.Z. AGAFONOVA
Analysis of the Application of Fire Protective Composition for Wooden Structures 10
- M.G. BRUYAKO, P.A. LIPKA, M.S. KALININA
Thermal Insulation Products Based on Modified Polyurethane Foam with Fire-Resistant Coating 14

Modern concretes

- V.G. SOLOVIEV, E.V. MATIUSHIN, L.I. EFISHOV
**Influence of Type and Volume Content of Steel Fiber on the Compressive Strength
of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. 20**
- S.S. KAPRIELOV, A.V. SHEYNFELD, V.I. TRAVUSH, N.I. KARPENKO, S.B. KRYLOV
**Assessment of Strength and Deformation Characteristics of High-Strength Concrete
in Structures and the Dynamics of Their Changes over Time. 28**
- T.C. NGUYEN, V.L. TANG, B.I. BULGAKOV
**Determination of Adiabatic Temperature in Hardening Concrete According
to Different Standards. 39**
- A.M. BAKHRAH, O.A. LARSEN, S.V. SAMCHENKO
**Influence of the Amount of Conductive Component on the Electrical Resistivity
of Fine-Grained Electrically Conductive Concrete 46**
- N.S. SOKOLOV, S.N. SOKOLOV, A.N. SOKOLOV
**Geotechnical Technology for the Construction of Engineering Structures
on Structurally Unstable Slopes 52**

Waste in production of building materials

- S.V. SAMCHENKO, M.G. BRUYAKO, A.M. ERGENYAN, V.A. SHVETSOVA
Building Composite Based on Gypsum Binder and Sosnovsky's Hogweed 56
- TANG VAN LAM, PHAM DUC LUONG, NGUYEN BA BINH, B.I. BULGAKOV, S.I. BAZHENOVA
Aerated Concrete with Geopolymer Binder from Technogenic Waste 63
- G.R. BUTKEVICH
Integrated Development of Technogenic Resources. 70

Строительные материалы № 11

Г.Р. БУТКЕВИЧ

Комплексное освоение техногенных ресурсов 70

Белорусскому заводу «Кричевцементношифер» 90 лет! (Информация) 74

Е.И. ЮМАШЕВА

Рынок отделочных и теплоизоляционных материалов в 2023 г. 75

Даешь керамзит в конструкции от фундамента до крыши! (Информация) 79

Н.В. ЛЮБОМИРСКИЙ, А.С. БАХТИН, Т.А. БАХТИНА, В.В. НИКОЛАЕНКО, Г.Р. БИЛЕНКО

Металлургические отходы как сырьевой резерв

для достижения углеродной нейтральности стройиндустрии.

Часть 1. Способность металлургических отходов связывать CO₂ 80

Материалы и технологии

А.И. ПАНЧЕНКО, В.А. МИХАЙЛОВ

Моделирование и экспериментальное исследование плотности упаковки пеностеклобетона 95

И.В. КОЗЛОВА, М.О. ДУДАРЕВА

Перспективная добавка на основе системы TiO₂-Bi₂O₃ для цементных композитов 100

Д.А. АЮПОВ, Р.И. КАЗАКУЛОВ

Водно-минеральные суспензии для ремонтных битумных паст 104

Stroitel'nye Materialy No. 11

The Belarusian plant "Krichevtsementnoshifer" 90 Years! (Information) 74

E.I. YUMASHEVA

Market of Finishing and Thermal Insulation Materials in 2023. 75

Provide expanded clay in the structure from the foundation to the roof! (Information) 79

N.V. LJUBOMIRSKIJ, A.S. BAHTIN, T.A. BAHTINA, V.V. NIKOLAENKO, G.R. BILENKO

Metallurgical Waste as a Raw Material Reserve

for Achieving Carbon Neutrality of the Construction Industry.

Part 1. Ability of Metallurgical Waste to Bind CO₂ 80

Materials and technologies

A.I. PANCHENKO, V.A. MIKHAILOV

Modeling and Experimental Study of Packing Density of Foam Glass Concrete. 95

I.V. KOZLOVA, M.O. DUDAREVA

A Promising Additive Based on the TiO₂-Bi₂O₃ System for Cement Compositions 100

D.A. AYUPOV, R.I. KAZAKULOV

Water-Mineral Suspensions for Repair Bituminous Pastes. 104

Главный редактор:

ЮМАСHEVA E. 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)

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

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

ФЕДОСОВ С. В.,
д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

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)

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,
engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,
Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

ASKADSKIY A.,
Doctor of Science (Chemistry),
Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,
Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

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

EROFEEV V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS
(Saransk)

FEDOSOV S.,
Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS
(Moscow)

FISHER H.-B.,
Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

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

KHOZIN V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

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)

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)

STROKOVA V.,
Doctor of Science (Engineering), Advisor of RAACS (Belgorod)

TRAVUSH V.,
Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

VERESHCHAGIN V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

YAKOVLEV G.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

УДК 630*841.21

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-5-9>

С.В. ФЕДОСОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (fedosov-academic53@mail.ru);
 А.А. ЛАЗАРЕВ², канд. техн. наук (kgn@edufire37.ru), Д.Е. ЦВЕТКОВ², инженер (cvetrov-dmitrii@mail.ru);
 В.Г. КОТЛОВ³, д-р техн. наук (kotlov.vitaliy@mail.ru); А.Ю. КОМЛЕВ², инженер (mchs04@mail.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
 (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново (153011, Иваново, пр-т Строителей, 33)

³ Поволжский государственный технологический университет (424000, г. Йошкар-Ола, площадь имени В.И. Ленина, 3)

Оценка качества пропитки древесины неорганическими антипиренами при автоклавировании

Рассмотрена проблема определения глубины пропитки древесины водным раствором гидрокарбоната натрия. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки метода неразрушающего контроля пропитанной антипиренами древесины с целью выявления производственного брака и (или) контрафактной продукции. Авторами статьи предлагается способ определения изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины при пропитке девятипроцентным раствором этой соли при различных условиях обработки в автоклаве. В работе по определению глубины пропитки девятипроцентным раствором гидрокарбоната натрия древесины при обработке в автоклаве был проведен эксперимент. В рамках данного эксперимента было запланировано подтвердить или опровергнуть рабочую гипотезу о наличии анизотропии древесины при послойном рассмотрении глубины ее пропитки водным раствором гидрокарбоната натрия в слоях при их получении распиливанием вдоль и поперек волокон. Запланировано также разработать методику проведения исследования образцов слоев древесины с пропиткой девятипроцентным водным раствором гидрокарбоната натрия при различных условиях автоклавирования. Требовалось установить закономерность изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины с соответствующей огнезащитной обработкой. Авторы планировали также получить уравнения для описания динамики изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины с пропиткой в различных условиях автоклавирования. Результаты этого эксперимента позволили получить уравнение динамики изменения массовой доли гидрокарбоната натрия в смыве со слоя древесины в продольном срезе образца. Определена величина коэффициента детерминации для полученного уравнения. При послойном рассмотрении глубины пропитки древесины водным раствором гидрокарбоната натрия в спилах слоев вдоль и поперек волокон наблюдалась анизотропия.

Ключевые слова: древесина, неорганические антипирены, метод неразрушающего контроля, уравнение.

Для цитирования: Федосов С.В., Лазарев А.А., Цветков Д.Е., Котлов В.Г., Комлев А.Ю. Оценка качества пропитки древесины неорганическими антипиренами при автоклавировании // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 5–9.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-5-9>

S.V. FEDOSOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (fedosov-academic53@mail.ru);

A.A. LAZAREV², Candidate of Sciences (Engineering) (kgn@edufire37.ru), D.E. CVETKOV², Engineer, (cvetrov-dmitrii@mail.ru);

V.G. KOTLOV³, Doctor of Sciences (Engineering) (kotlov.vitaliy@mail.ru); A.Yu. KOMLEV², Engineer, (mchs04@mail.ru)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, (33 Stroiteley Street, Ivanovo, 153011, Russian Federation)

³ Volga State University of Technology (3 Square named after V.I. Lenin, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation)

Evaluation of the Quality of Wood Impregnation with Inorganic Fire Retardants During Autoclaving

The problem of determining the depth of impregnation of wood with an aqueous solution of sodium bicarbonate is considered. The relevance of the study is due to the need to develop a method of non-destructive testing of wood impregnated with flame retardants in order to identify industrial defects and (or) counterfeit products. The authors of the article propose a method for determining changes in the concentration of sodium bicarbonate in flushes from wood layers when impregnated with a nine percent solution of this salt under various conditions of treatment in an autoclave. In the work on determining the depth of impregnation with a nine percent sodium bicarbonate solution of wood during autoclave treatment, an experiment was conducted. Within the framework of this experiment, it was planned to confirm or refute the working hypothesis about the presence of anisotropy of wood by layer-by-layer examination of the depth of its impregnation with an aqueous solution of sodium bicarbonate in layers when they are obtained by sawing along and across the fibers. It was also planned to develop a methodology for conducting a study of samples of wood layers impregnated with a nine percent aqueous solution of sodium bicarbonate under various autoclaving conditions. It was also necessary to establish a pattern of changes in the concentration of sodium bicarbonate in flushes from wood layers with appropriate flame retardant treatment. The authors also planned to obtain equations to describe the dynamics of changes in the concentration of sodium bicarbonate in flushes from impregnated wood layers under various autoclaving conditions. The results of this experiment made it possible to obtain an equation of the dynamics of the change in the mass fraction of sodium bicarbonate in the flushing from the wood layer in the longitudinal section from the sample. The value of the coefficient of determination for the resulting equation is determined. When layer-by-layer examination of the depth of impregnation of wood with an aqueous solution of sodium bicarbonate, anisotropy was observed in the cuts of layers along and across the fibers.

Keywords: wood, inorganic flame retardants, non-destructive testing method, equation.

For citation: Fedosov S.V., Lazarev A.A., Tsvetkov D.E., Kotlov V.G., Komlev A.Yu. Assessment of the quality of wood impregnation with inorganic flame retardants during autoclaving. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 5–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-5-9>

Известно, что в состав древесины входят преимущественно органические вещества. У разных пород древесины практически одинаков химический состав. Абсолютно сухая древесина в среднем содержит 49% углерода, 44% кислорода, 6% водорода, 0,1–0,3% азота и прочих атомов. Влажность древесного сырья, его температура, удельное давление и продолжительность прессования материала оказывают существенное влияние на изменение химического состава древесины. После сжигания древесины остается зола – ее неорганическая часть. В состав золы входят кальций, калий, магний и другие элементы, которые являются составляющими основных органических веществ – целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы. В древесине содержится порядка 45–60% целлюлозы, 15–35% лигнина, 15–25% гемицеллюлозы (<http://www.drevesinas.ru/woodstructura/chemical/1.html>).

Использование древесины в качестве строительного материала и в давние времена и в современности не утратило своего значения, так как этот материал имеет ряд достоинств: низкая теплопроводность, сравнительно высокая прочность при незначительной плотности, достаточная упругость, удобство для механической обработки, долговечность [1–19]. При правильной эксплуатации деревянные конструкции могут сохраняться длительный период времени. Нет такой производственной сферы, где бы не применялась древесина. Из древесины изготавливают несущие конструкции и ограждающие элементы зданий. Широко применяются столярные изделия из древесины: двери, окна, плинтусы, полы, наличники. Для изготовления древесно-волоконистых, древесно-стружечных плит, арболита, фибролита используются отходы древесины. Клееные деревянные конструкции и детали, как правило, легче и прочнее обычных, надежнее при эксплуатации. Их применяют для покрытий производственных, сельскохозяйственных зданий (в том числе в условиях химически агрессивной среды) [7–11].

Однако существенным недостатком древесины является ее горючесть. При нагревании до 110°C происходит удаление влаги и начинается выделение газообразных продуктов термической деструкции. При нагреве до 150°C поверхность древесины со стороны теплового воздействия становится желтого цвета, увеличивается выделение количества летучих веществ. При 150–250°C она становится коричневого цвета из-за обугливания, а при 250–300°C воспламеняются продукты разложения древесины. Температура самовоспламенения древесины находится в диапазоне 350–450°C [7–11].

Следовательно, термическое разложение древесины состоит из двух фаз: 1 – распад, который можно наблюдать при нагреве до 250°C (до температуры воспламенения), происходит с поглощением тепла; 2 – горение, процесс предполагает выделение тепла. Во второй фазе можно выделить два периода: горение газов, образовавшихся при термическом разложении древесины (фаза пламенного горения), и

горение сформировавшегося древесного угля (фаза тления). Огнезащита древесины осуществляется несколькими способами, различаемыми по механизму огнезащитного эффекта. Наиболее доступным способом огнезащиты деревянных конструкций является покрытие их огнезащитными красками и обмазками. Они включают связующее вещество, наполнитель и пигмент. Антипиреном при этом является наполнитель [7–11].

Понимание химического состава древесины может служить основанием для оценки качества пропитки древесины антипиренами при автоклавировании. При планировании эксперимента рассматривались результаты различных исследований.

Проблемам изучения свойств конструкций из древесины посвящены многие исследования [1–10]. Изучением проблем изготовления деревянных строительных конструкций занимался Н.Г. Серегин [1]. Поведение усиленных деревянных элементов в различных условиях описано С.И. Рошиной, М.В. Лукиным, М.С. Лисятниковым [2].

Авторы [4] проводили огневые испытания конструкций (балок), на которых имелись огнезащитные пленочные покрытия. Опыт был поставлен в условиях стандартного температурного режима пожара, производилось одностороннее огневое воздействие. По результатам экспериментов подготовлены предложения по проведению расчетно-аналитической оценки показателей огнестойкости и классов пожарной опасности деревянных конструкций, имеющих неконструктивную огнезащиту [4]. В работе [5] авторы рассматривали пропитку древесины после неполной сушки в целях управления энергопотреблением. В работе [6] проводили огневое испытание подвергнутой огнезащитной обработке древесины, а в [7] исследовали влияние теплового потока на пожароопасность образцов древесины. Вопросы нормативных требований к огнезащите древесины и проведению экспертной оценки ее качеств рассматривались в [8]. В [9] проведена оценка огнестойкости строительных элементов, где применялась интумесцентная огнезащита. Изучение эффективности огнезащитных составов, нанесенных на различные породы древесины, осуществляли авторы работы [10]. Однако проблема определения глубины пропитки древесины растворами неорганических солей должным образом не рассматривалась. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки метода неразрушающего контроля пропитанной огнезащитным составом древесины для выявления производственного брака и контрафактной продукции. Существующие методы предполагают только огневые испытания.

Объектом проведенного исследования является древесина сосны с влажностью не более 12%.

Предметом исследования была динамика изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины, пропитанной девятипроцентным раствором данной соли при различных условиях автоклавирования.



Рис. 1. Экспериментальная установка для обработки в автоклаве: *a* – общий вид; *b* – вид внутри автоклава

Fig. 1. Experimental setup for autoclave processing: *a* – general view; *b* – view from inside the autoclave



Рис. 2. Вид торцевой части соснового бруска после обработки в автоклаве

Fig. 2. View of the end part of a pine block after processing in an autoclave

Задачи исследования

1. Подтвердить рабочую гипотезу о наличии низотропии древесины при послойном рассмотрении глубины ее пропитки водным раствором гидрокарбоната натрия в слоях, полученных распиливанием вдоль и поперек волокон.

2. Описать методику проведения исследования образцов слоев древесины, пропитанной девятипроцентным водным раствором гидрокарбоната натрия при различных условиях автоклавирования.

3. Установить закономерность изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины, подвергшейся соответствующей огнезащитной обработке.

4. Получить уравнения, описывающие динамику изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины, пропитанной в различных условиях автоклавирования.

Для испытания использовались сосновые бруски сечением $0,05 \times 0,05$ м. Длина брусков $0,25$ м. Данные пиломатериалы являются радиальными (по отношению к продольной оси бревна), т. е. из сердцевинной и центральной части бревна, имеющие на поверхности полосатый рисунок текстуры. Влажность древесины измерялась прибором ЕМТ 01. Она составляла

не более 12%. Древесина с более высокими показателями влажности к проведению исследования не допускалась.

Бруски в количестве трех штук опускались в автоклав (рис. 1) и закреплялись к специальной полке при помощи химических стойких нитей. Затем емкость автоклава наполнялась 9%-м водным раствором гидрокарбоната натрия (NaHCO_3) таким образом, чтобы бруски находились полностью погруженными в раствор. Автоклавирование осуществлялось в течение 6 ч при давлении 4 атм и температуре 120°C .

Далее испытания проводились в два этапа. Первый этап предполагал испытание слоев древесины, полученных при распиливании вдоль волокон. На втором этапе испытывались слои древесины, полученные в результате распиливания соснового бруска поперек волокон (рис. 2). Средняя толщина срезаемых слоев равнялась $1,5$ мм. Смыв с каждого спиленного слоя осуществлялся дистиллированной водой в количестве 30 мл. Время погружения спиленного слоя в дистиллированную воду (20°C) варьировалось от 20 мин до 24 ч. Далее концентрация гидрокарбоната натрия в смыве определялась при помощи рефрактометра.



Рис. 3. Спили образца с распилом: *a* – вдоль волокон; *b* – поперек волокон

Fig. 3. Sample cuts with cutting: *a* – along the grain; *b* – across the fibers

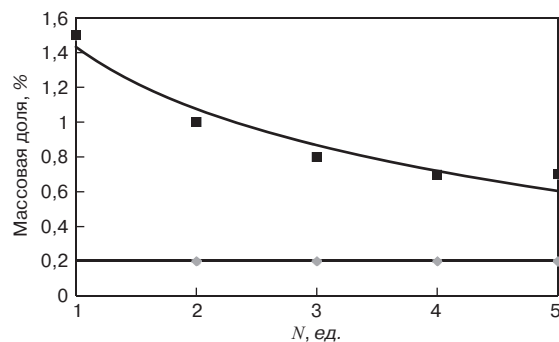


Рис. 4. Распределение величины массовой доли гидрокарбоната натрия в смыве по слоям древесины

Fig. 4. Distribution of the mass fraction of sodium bicarbonate in the washout over the layers of wood

На рис. 3 представлены спилов соснового бруска, выполненные соответственно на первом и втором этапах исследования.

На рис. 4 представлена динамика изменения массовой доли гидрокарбоната натрия в смыве со слоя древесины на первом этапе исследования. Серыми ромбиками обозначена зависимость массовой доли гидрокарбоната натрия от номера среза после нахождения исследуемого среза с образца в течение 20 мин в воде. Черными квадратиками обозначена зависимость массовой доли гидрокарбоната натрия от номера среза после нахождения исследуемого среза с образца в течение 24 ч в воде. Полученные результаты смывов были проанализированы, проведена аппроксимация данных, рассчитан коэффициент детерминации ($R^2 \leq 1$).

Из данных рис. 4 видно, что зависимость $M_d = f(N)$ носит логарифмический характер. По итогам аппроксимации данных получено уравнение (1):

$$M_d(N) = -0,515 \ln(N) + 1,433, \quad (1)$$

где M_d – массовая доля гидрокарбоната натрия в водном растворе на первом этапе эксперимента после нахождения исследуемого образца в течение 24 ч, %; N – номер среза слоя древесины размером 1,5 мм, ед.; $1 \leq N \leq 5$. Коэффициент детерминации для уравнения (1) $R^2 = 0,946$.

На втором этапе исследования послыной динамики в смывах спилов в течение 24 ч наблюдений не установлено. Массовая доля соли в смыве с каждого из пяти спилов с образца была равна 0,2% через 20 мин и 0,8% через 24 ч.

Полученные результаты объясняются взаимодействием компонентов твердой и жидкой фаз. Отвод от поверхности спилов образцов древесины в объем жидкости молекул (ионов), переходящих в раствор соли.

Величину диффузионного потока (Π) для гетерогенного процесса описывает уравнение [10, 11]:

$$\Pi = \beta (C_1 - C_t), \quad (2)$$

где β – коэффициент массоотдачи; C_1 – максимальная концентрация гидрокарбоната натрия, соответствующая его растворимости при данной температуре; C_t – переменная концентрация гидрокарбоната натрия, которая зависит от момента ее определения t (через 20 мин и 24 ч).

При сопоставлении результатов эксперимента можно прийти к выводу об их непротиворечивости с описанными в уравнениях гетерогенными процессами внешнего массопереноса [11, 12].

В работе по определению глубины пропитки девятипроцентным раствором гидрокарбоната натрия древесины при автоклавировании был проведен эксперимент, который позволил сделать следующие выводы:

1. Подтверждена рабочая гипотеза о наличии анизотропии древесины при послыном рассмотрении глубины ее пропитки водным раствором гидро-

карбоната натрия вдоль и поперек волокон. На первом этапе исследования имеет место послыная динамика в смывах с продольных образцов спилов древесины. На втором этапе такой динамики в смывах спилов образцов не наблюдается.

2. Предложена методика проведения исследования образцов слоев древесины, пропитанной девятипроцентным раствором гидрокарбоната натрия, при различных условиях автоклавирования.

3. Установлена закономерность изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины, подвергнутой соответствующей огнезащитной обработке, полученных в результате продольного спиливания.

4. Уравнение (1) позволяет с определенной степенью достоверности рассчитать динамику изменения концентрации гидрокарбоната натрия в смывах со слоев древесины, подвергнутой соответствующей огнезащитной обработке.

Список литературы / References

1. Seregin N.G. Losses in the manufacture of wooden building structures. *Journal of Physics: Conference Series. Modelling and Methods of Structural Analysis*. Vol. 1425. 13–15 November 2019. Moscow. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012133
2. Roshchina S., Lukin M., Lisyatnikov M. Compressed-bent reinforced wooden elements with long-term load. *In book: Proceedings of EECE 2019, Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2020, pp. 81–91.
3. Fedosov S.V., Lazarev A.A., Kotlov V.G., Malichenko V.G., Tsvetkov D.E. Suspended ceiling safety for firefighters in case of fire in the attic. *International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2022: Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety*. 2022. pp. 513–522. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21120-1_49
4. Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B., Kenzhehan S.K. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 5 (81). DOI: 10.18720/MCE.81.1
5. Kantyshev A.V., Zaitseva M.I., Kolesnikov G.N. Model of wood impregnation after incomplete drying as an additional energy management tool. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1333. Iss. 3. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032033>
6. Gravit M.V., Serdjuk D., Vatin N., Lazarev Y.G., and Yuminova M.O. Single burning item test for timber with fire protection. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 3(95), pp. 19–30.
7. Kasymov D., Agafontsev M., Perminov V., Martynov P., Reyno V., Loboda E. Experimental investigation of the effect of heat flux on the fire behavior of engineered wood samples. *Fire*. 2020. 3 (4). 61. <https://doi.org/10.3390/fire3040061>
8. Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б., Бирюков Е.П.,

- Нормативные требования к огнезащите древесины и экспертная оценка ее качества // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2016. № 2. С. 77–80.
8. Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.V., Biryukov E.P., Regulatory requirements for fire protection of wood and expert assessment of its quality *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya*. 2016. No. 2, pp. 77–80. (In Russian).
 9. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Огнестойкость строительного элемента с интумесцентной огнезащитой: стандартная оценка и экспресс-анализ // *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023. Т. 7. № 2. С. 38–46.
 9. Martynov A.V., Grekov V.V., Popova O.V. Fire resistance of a building element with intumescent fire protection: standard assessment and express analysis *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnnykh sistem*. 2023. Vol. 7. No. 2, pp. 38–46. (In Russian).
 10. Бороздин С.А., Гитцович Г.А., Ветров В.В., Морозов С.С. Эффективность огнезащитных составов при нанесении их на различные породы древесины // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2020. № 3 (36). С. 70–76.
 10. Borozdin S.A., Gitsovich G.A., Vetrov V.V., Morozov S.S. The effectiveness of fire retardant compounds when applied to various types of wood *Sovremennyye problemy grazhdanskoй zashchity*. 2020. No. 3 (36), pp. 70–76. (In Russian).
 11. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. М.: Стройиздат, 1977. 220 с.
 11. Ratinov V.B., Ivanov F.M. *Khimiya v stroitel'stve*. [Chemistry in construction]. Moscow: Stroyizdat. 1977. 220 p.
 12. Федосов С.В., Степанова В.Ф., Румянцева В.Е. и др., Коррозия строительных материалов: проблемы, пути решения. М.: АСВ, 2022. 400 с.
 12. Fedosov S.V., Stepanova V.F., Rumyantseva V.E. et al. *Korroziya stroitel'nykh materialov: problemy, puti resheniya* [Corrosion of building materials: problems, solutions]. Moscow: ASV. 2022. 400 p.
 13. Ioannidou D., Sonnemann G., Pommier R., Habert G. Evaluating the risks in the construction wood product system through a criticality assessment framework. *Resources, conservation and recycling*. 2019. Vol. 146, pp. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.021>
 14. Peng H., Salmén L., Jiang J., Lu J. Creep properties of compression wood fibers. *Wood Science and Technology*. 2020. Vol. 54. No. 6, pp. 1497–1510. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01221-1>
 15. Орешкин Д.В. Теоретическое обоснование использования древесины мягколиственных пород в строительстве // *Строительные материалы*. 2015. № 7. С. 30–33.
 15. Oreshkin D.V. Theoretical justification for the use of soft-leaved wood in construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 7, pp. 30–33. (In Russian).
 16. Поляков Т.А., Поварова О.А. Подготовка древесных материалов для строительства и декора путем обработки древесины комбинированным воздействием ультрафиолета и СВЧ-излучения // *Вестник Волгоградского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 2 (8). С. 75–77.
 16. Polyakov T.A., Povarova O.A., Preparation of wood materials for construction and decoration by processing wood with the combined influence of ultraviolet and microwave radiation. *Vestnik of Volgograd State University. Technical science*. 2020. No. 2 (8), pp. 75–77. (In Russian).
 17. Vladimirova O.A., Sopilov V.V., Bobyleva A.V., Labudin B.V., Popov E.V. Wood-composite structures with non-linear behavior of semi-rigid shear ties. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021. No. 4 (97). 9702. <https://doi.org/10.4123/CUBS.97.2>
 18. Попов Е.В., Русланова А.В., Сопилов В.В., Ждралович Н., Мамедов Ш.М., Лабудин Б.В. Контактное взаимодействие когтевой шайбы с древесиной от предельного сдвига // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2020. № 4. С. 178–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189
 18. Popov E.V., Ruslanova A.V., Sopilov V.V., Zdralovic N., Mamedov S.M., Labudin B.V. Contact interaction of a claw washer with wood at limiting shear. *Russian Forestry Journal*. 2020. No. 4 (376), pp. 178–189. (In Russian). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-178-189>
 19. Labudin B.V., Karelskiy A.V., Lyapin D.M. Theoretical preconditions for determination of the elastic modulus of CLT-panels. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 992, pp. 998–1005. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.998>

**Как живет и трудится редакция издательства «Стройматериалы»,
как делаются наши журналы,**

что нового и интересного в отрасли — расскажем и покажем!

Объединение профессионалов гарантирует успех!

Оставайтесь с нами!

Присоединяйтесь к нашему Телеграм-каналу:

https://t.me/journal_cm



Ю.Н. КОВАЛЬ¹, канд. биол. наук (a_yulya@inbox.ru),
А.С. АНДРЕЕВ¹, студент (a_yulya@inbox.ru);
Н.З. АГАФОНОВА², преподаватель (natalya-markiv@mail.ru)

¹ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1)

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Анализ применения огнезащитной композиции для деревянных конструкций

В строительстве в качестве несущих и ограждающих конструкций обычно используют древесину хвойных пород. Для древесины характерна способность к воспламенению и распространению горения при нагревании на воздухе. Деревянные строительные конструкции несут пожарную опасность, так как при первоначальном импульсе внешней тепловой энергии возможно воспламенение. Кроме того, при возникновении пожара в зданиях и сооружениях, где находится древесина, возникает целый ряд опасных факторов пожара: пламя, искры, тепловой поток, токсичные продукты горения, экстремально низкая концентрация кислорода, понижение видимости при задымлении. В связи с этим становится актуальной обработка древесины специальными составами, которые повышают сопротивляемость огню. Авторы рассмотрели пожароопасные свойства строительных конструкций из древесины, произвели анализ огнезащитной обработки деревянных конструкций специальной композицией; рассмотрели пожароопасные свойства строительных конструкций из древесины, механизм пиролиза, действие огнезащитной обработки на поведение древесины при огневом воздействии. Применение антипирена значительно повлияло на процессы пиролиза образцов. Полученная информация в ходе исследования позволила оценить степень различий в значениях средней потери массы образцов, обработанных разными огнезащитными составами. Образцы с использованием огнезащитного состава имеют меньшую глубину обугливания. Повреждения, связанные с термическим воздействием, кардинально отличаются от необработанных образцов. У обработанных и пропитанных образцов наблюдается быстрая потеря массы. Это связано с тем, что у них при воздействии высокой температуры в печи ускоряются реакции дегидратации и сшивания молекул целлюлозы.

Ключевые слова: антипирены, деревянные конструкции, повышение огнестойкости, огнезащитная обработка.

Автор выражает благодарность Краевому государственному автономному учреждению «Краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности». Участие в III Всероссийской конференции «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», посвященной 90-летию кафедры строительных материалов, 15–16 ноября 2023 г. в г. Москве возможно благодаря финансовой поддержке Краевого фонда науки. Заявка № 20230615-03792.

Для цитирования: Коваль Ю.Н., Андреев А.С., Агафонова Н.З. Анализ применения огнезащитной композиции для деревянных конструкций // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 10–13. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-10-13>

Yu.N. KOVAL¹, Candidate Sciences (Biology) (a_yulya@inbox.ru),

A.S. ANDREEV¹, Student (a_yulya@inbox.ru);

N.Z. AGAFONOVA², Senior Lecturer (natalya-markiv@mail.ru)

¹ Siberian Fire and Rescue Academy State Fire Service EMERCOM of Russia (1, Severnaya Street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russian Federation)

² National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl'skoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Analysis of the Application of Fire Protective Composition for Wooden Structures

In construction, coniferous wood is usually used as load-bearing and enclosing structures. Wood is characterized by the ability to ignite and spread combustion when heated in air. Wooden building structures pose a fire hazard, since with an initial impulse of external thermal energy, ignition is possible. In addition, when a fire occurs in buildings and structures where wood is located, a number of dangerous fire factors arise: flames, sparks, heat flow, toxic combustion products, extremely low oxygen concentrations, decreased visibility due to smoke. In this regard, it becomes relevant to treat wood with special compounds that increase resistance to fire. The authors examined the fire hazardous properties of building structures made of wood, analyzed the fire retardant treatment of wooden structures with a special composition; examined the fire hazardous properties of building structures made of wood, the mechanism of pyrolysis, and the effect of fire retardant treatment on the behavior of wood when exposed to fire. The use of fire retardant significantly affected the pyrolysis processes of the samples. The information obtained during the study made it possible to assess the degree of differences in the values of the average weight loss of samples treated with different fire retardants. Samples using a fire retardant composition have a shallower charring depth. Damage associated with thermal exposure is fundamentally different from untreated samples. Treated and impregnated samples exhibit rapid weight loss. This is due to the fact that in treated and impregnated samples, when exposed to high temperatures in the oven, the reactions of dehydration and cross-linking of cellulose molecules are accelerated.

Keywords: fire retardant, wooden structure, fire retardant treatment, fire resistance.

The author expresses gratitude to the Regional State Autonomous Institution «Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific-Technical Activities». Participation in the III All-Russian Conference «Building Materials Science: Present and Future», dedicated to the 90th anniversary of the Department of Building Materials on November 15–16, 2023 in Moscow is possible thanks to the financial support of the Regional Science Foundation, application No. 20230615-03792.

For citation: Koval Yu.N., Andreev A.S., Agafonova N.Z. Analysis of the application of fire protective composition for wooden structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 10–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-10-13>

Древесина распространена как строительный материал и широко применяется с давних времен. У нее множество достоинств – прочность, малая теплоемкость, легкость обработки. К недостаткам можно отнести склонность к гниению и высокий риск возникновения пожара. В целях предотвращения негативного воздействия микроорганизмов и обеспечения огнестойкости строительных конструкций древесину обрабатывают различными огнезащитными составами. Обеспечение огнестойкости является актуальным вопросом, так как необработанные конструкции из древесины разрушаются при воздействии огня в течение нескольких минут. Кроме того, при возникновении пожара в зданиях и сооружениях, где находится древесина, возникает целый ряд опасных факторов пожара: пламя, искры, тепловой поток, токсичные продукты горения, экстремально низкая концентрация кислорода, понижение видимости при задымлении. Опасные факторы пожара могут угрожать жизни людей. Термическое разложение, или пиролиз древесины, характеризуется выделением продуктов полного и неполного сгорания (CO , CH_4 , H_2 , CO_2 , H_2O) [1]. Данная газовая смесь способна к воспламенению. Воздействие огня на незащищенную древесину приводит к образованию углистого остатка и потере несущей способности конструкций зданий и сооружений. При поднятии температуры на поверхности материала до 230–250°C древесина целиком лишается способности сопротивляться действующим нагрузкам. После огневых воздействий на древесину сооружения чаще всего подлежат сносу. При огнезащитной обработке специальными составами подавляются процессы воспламенения древесины и снижается вероятность воздействия опасных факторов пожара.

Антипирены наносят на древесину с целью наделять материал огнеупорными свойствами. По степени эффективности антипирены подразделяют на следующие группы [2]:

– I группа: при обработке позволяет получить трудносгораемый материал. При воздействии высокой температуры количество потерянной массы древесины составляет до 9%;

– II группа: при воздействии высокой температуры количество потерянной массы материала составляет от 9% до 25%;

– III группа: при воздействии огня потеря массы составляет от 25% и выше.

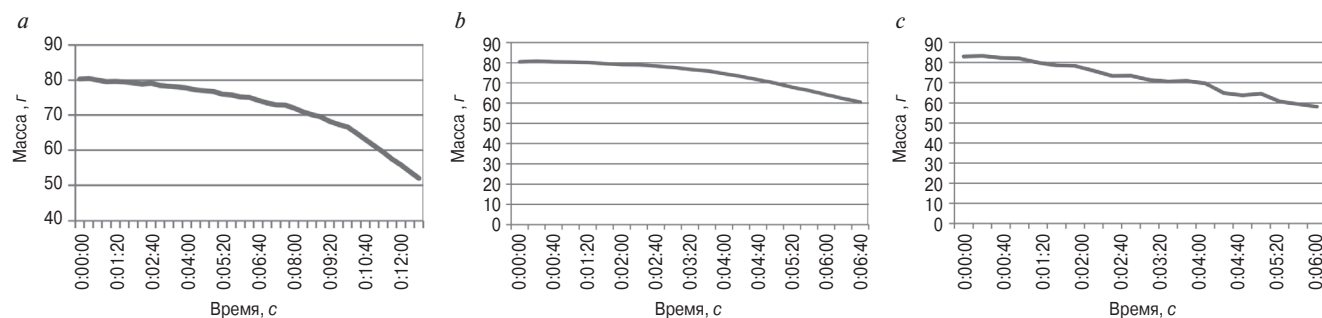
Также подразделяют антипирены по способу обработки: покрытие и пропитка. Доказано, что пропитка древесины является более эффективной, чем поверхностный метод обработки, так как при пропитывании специальные вещества проникают в глубь материала. Установлено, что чем лучше пропитана древесина, тем надежнее она защищена [3]. Наибольшей эффективности можно достичь, если древесину пропитать в автоклаве в режиме последовательного увеличения давления или методом горячехолодных ванн или чередования вакуума и повышенного давления [4].

Отдавая предпочтение определенному антипирену, необходимо принимать во внимание особенности горения каждого типа древесного материала.

Антипирен – это химическое вещество водо- или органорастворимое. Наиболее распространены водорастворимые, так как они не требуют применения опасных и горючих растворителей. Хорошим антипиреном выступает смесь буры с боратом водорода и смесь натриевой соли ортофосфорной кислоты с диаммониевой солью серной кислоты. Наиболее распространены в применении водорастворимые средства, которые имеют в своем составе фосфаты. Так, гидрофосфат аммония чаще всего используют в смеси с аммонием сернокислым. Такая химическая композиция при повышении температуры начинает выделять инертные газы и окислы фосфора. За счет этого окислы фосфора постепенно покрывают материал огнеупорной защитной пленкой [5]. Но, как правило, в состав огнезащитных композиций для древесины входят многокомпонентные системы. Каждое вещество в составе выполняет свою функциональную роль в обеспечении общего защитного эффекта.

Качество огнезащитной обработки определяют по многочисленным показателям, к примеру время до обугливания и глубина прогорания древесины [6–8].

Чаще всего при строительстве применяют прозрачные терморасширяющиеся составы на водной основе и огнезащитную лаковую композицию [9].



Зависимость потери массы от времени теплового воздействия на образцы: *a* – необработанные антипиреном; *b* – обработанные антипиреном; *c* – пропитанные антипиреном
 Dependence of weight loss from time of thermal effects on samples: *a* – untreated with fire retardant; *b* – treated with fire retardant; *c* – impregnated with fire retardant

Это позволяет перевести древесный материал в группу слабогорючих и трудновоспламеняющихся материалов и снизить конструкционную пожарную опасность [7, 10].

Цель исследования: экспериментальными методами произвести анализ огнезащитной обработки деревянных конструкций.

Задачи

— составить химическую композицию антипирена;
— провести экспериментальные исследования по выявлению особенностей горения древесины, обработанной химической композицией.

Материалы и методы

В качестве основы для химической композиции был взят диаммоний фосфата в смеси с сульфатом аммония [3]. Огнезащитная эффективность определялась согласно контрольному методу испытаний по ГОСТ Р 53292–2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний». Эксперименты проводились с применением методик и средств измерения по ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть».

В ходе исследования подготовили девять опытных образцов, выполненных из древесины. На три образца с помощью кисти был нанесен огнезащитный состав, расход антипирена составил 300 г/м² (обработанные образцы). Еще три образца древесины пропитали посредством замачивания в антипирене на 12 ч, расход антипирена составил 600 г/м² (пропитанные образцы). Три образца не обрабатывались антипиренами и служили в качестве контрольных. Образцы доводили до единой влажности 2–3% методом принудительной сушки. Далее их взвешивали на электронных весах и фиксировали массу [11].

После обработки антипиреном в древесину забивали по четыре гвоздя с четырех сторон по шляпку. Это было сделано для того, чтобы после эксперимента оценить глубину обугливания.

Проведение огневых испытаний

Древесина помещалась в установку «керамическая труба». Напряжение на латре выставляли 55В, что способствовало нагреванию печи до 350°C; на поверхности образцов температура составляла 300°C. Перед каждым проведением испытания температура печи замерялась пирометром.

В ходе проведения испытания железный штатив устанавливался на электронные весы. На весы под-

Список литературы

1. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства: Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. 262 с.

вешивался за гвоздь образец древесины. В ходе эксперимента на каждые 5 г уменьшения образца фиксировалось время. При суммарной потере 20 г испытание считалось завершенным. После проведения испытания образец зачищался с боковых граней от коксового слоя, где были забиты гвозди.

По гвоздям измерительным прибором снимались размеры от шляпки до неповрежденной древесины образца.

По ходу огневого испытания всех образцов каждые 20 с фиксировалась масса образца (см. рисунок).

Результаты исследования

Применение антипирена значительно повлияло на процессы пиролиза образцов. Полученная информация в ходе исследования позволила оценить степень различий в значениях средней потери массы образцов, обработанных разными огнезащитными составами. Образцы с использованием огнезащитного состава имеют меньшую глубину обугливания. Повреждения, связанные с термическим воздействием, кардинально отличаются от необработанных образцов. У обработанных и пропитанных образцов наблюдается быстрая потеря массы. Это связано с тем, что у них при воздействии высокой температуры в печи ускоряются реакции дегидратации и сшивания молекул целлюлозы. Также у обработанных и пропитанных образцов во время испытания наблюдалось образование угольного слоя на поверхности образца, что препятствовало воспламенению. Глубина обугливания у обработанных образцов была намного меньше, чем у необработанных образцов [4].

Выводы

Применение специальных огнезащитных композиций может значительно повлиять на процесс пиролиза древесины. Антипирены не дают древесине воспламениться, что значительно повышает пожарную безопасность древесины как строительного материала. И их всеобщее применение в строительстве может значительно снизить риск пожаров [1, 12].

References

1. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Gorenie drevesiny i ee pozharoопасnye svoystva: monografiya [Wood combustion and its fire hazardous properties: monograph]. Moscow: Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2010. 262 p.
2. Afanasyev S.V., Balakin V.M. Teoriya i praktika ogneshchity drevesiny i drevesnykh izdelii: monografiya [Theory and practice of fire protection of wood and wood products: monograph]. Samara: Publishing House of SamSC RAS. 2012. 138 p.
3. Gonova V.A., Kunin A.V. Preparation of a fire extinguishing powder composition based on synthesized

2. Афанасьев С.В., Балакин В.М. Теория и практика огнезащиты древесины и древесных изделий: Монография. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. 138 с.
3. Гонова В.А., Кунин А.В. Получение огнетушащего порошкового состава на основе синтезированного моноаммонийфосфата. *Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции*. 31 октября 2022 года. Новомосковск. С. 225–230.
4. Кашипов Р.Р., Клевеко В.И. Огнезащита деревянных конструкций методом глубокой пропитки в автоклаве // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2020. Т. 2. С. 149–153.
5. Корольченко А.Я., Корольченко О.Н. Средства огнезащиты: Справочник. М.: Пожнаука, 2006. 258 с.
6. Ломакин А.Д. Защита деревянных конструкций. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2013. 424 с.
7. Ломакин А.Д. Защита большепролетных несущих клееных деревянных конструкций // *Строительные материалы*. 2015. № 7. С. 55–59.
8. Ломакин А.Д. Защита клееных деревянных конструкций в заводских условиях // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 111–115.
9. Славик Ю.Ю., Гусаров Е.Ф. Защитно-декоративные лакокрасочные акриловые составы для деревянных конструкций и изделий // *Строительные материалы*. 2003. № 5. С. 38–39.
10. Славик Ю.Ю., Гусаров Е.Ф. Препараты для огнебиозащитной обработки деревянных конструкций // *Строительные материалы*. 2003. № 5. С. 42–43.
11. Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б., Бирюков Е.П. Нормативные требования к огнезащите древесины и экспертная оценка ее качества // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2016. № 2. С. 77–80.
12. Lowden L.A., Hull T.R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // *Fire Science Reviews*. 2013. No. 2. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>
- monoammonium phosphate. *Problems of science. Chemistry, chemical technology and ecology: Collection of materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Novomoskovsk. October 31, 2022, pp. 225–230. (In Russian).
4. Kashipov R.R., Kleveko V.I. Fire protection of wooden structures by deep impregnation in an autoclave. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2020. Vol. 2, pp. 149–153. (In Russian).
5. Korolchenko A.Ya., Korolchenko O.N. Sredstva ogn-ezashchity: spravochnik [Fire protection means: a reference book]. Moscow: Pozhnauka. 2006. 258 p.
6. Lomakin A.D. Zashchita derevyannykh konstruktсий [Protection of wooden structures]. Moscow: Stroymaterialy. 2013. 424 p.
7. Lomakin A.D. Protection of long-span load-bearing laminated timber structures. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2015. No. 7, pp. 55–59. (In Russian).
8. Lomakin A.D. Protection of laminated timber structures in factory conditions. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2013. No. 4. pp. 111–115. (In Russian).
9. Slavik Yu.Yu., Gusarov E.F. Protective and decorative acrylic paint and varnish compositions for wooden structures and products. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2003. No. 5, pp. 38–39. (In Russian).
10. Slavik Yu.Yu., Gusarov E.F. Preparations for fire-bio-protective treatment of wooden structures. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2003. No. 5, pp. 42–43. (In Russian).
11. Polishchuk E.Yu., Sivenkov A.B., Biryukov E.P. Regulatory requirements for fire protection of wood and expert assessment of its quality. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya*. 2016. No. 2, pp. 77–80. (In Russian).
12. Lowden L.A., Hull T.R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*. 2013. No. 2. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Монография «Защита деревянных конструкций»

Автор – Ломакин А.Д.

Рассмотрены вопросы конструкционной и химической защиты деревянных конструкций, используемых в малоэтажном домостроении, при строительстве зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, в том числе, с химически агрессивной средой, а также открытых сооружений (автодорожных и пешеходных мостов, опор ЛЭП и др.). Освещены вопросы защиты от эксплуатационных воздействий и возгорания несущих конструкций из клееной древесины и ЛВЛ и приведено краткое описание наиболее эффективных средств и способов их защиты. Описаны методы оценки защитных свойств покрытий для древесины, методика и результаты натурных климатических испытаний покрытий на образцах и фрагментах конструкций. Приведены методика и результаты мониторинга влажностного состояния несущих клееных деревянных конструкций в процессе эксплуатации.



Заявки направляйте в редакцию по e-mail: mail@rifsm.ru,

по тел.: (499) 390-87-17.

Оформляйте заказ на сайте www.rifsm.ru

М.Г. БРУЯКО, канд. техн. наук (mbruyako@yandex.ru), П.А. ЛИПКА, аспирант (petr.lipka2020@gmail.com), М.С. КАЛИНИНА, бакалавр (manyasha.kms@mail.ru)

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

Теплоизоляционные изделия на основе модифицированного пенополиуретана с огнезащитным покрытием

В рамках проведенного исследования были получены теплоизоляционные изделия на основе жесткого пенополиуретана (ППУ) с пониженной группой горючести. Изучено влияние модификации ППУ окисленным терморасширяющимся графитом (ОТГ) на физико-механические и пожароопасные свойства. В качестве исходной композиции для модификации применялась двухкомпонентная система заводской готовности с показателем группы горючести Г4. В качестве модификатора использовался ОТГ марки КР 350-80, характеризующейся степенью расширения минимум 370 мл/г, температурой начала расширения 170°C. Изделия из ППУ были модифицированы методом диспергирования ОТГ в реакционноспособной композиции, а также методом нанесения огнезащитного покрытия при литьевом формовании масс. Были изготовлены образцы и проведены испытания по определению группы горючести в соответствии с ГОСТ 30244-94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть». Установлено, что увеличение концентрации ОТГ в огнезащитном покрытии и структуре материала снижает горючесть изделий, при этом модификация методом диспергирования позволяет получить материал с группой горючести (Г3), однако оказывает влияние на технологические свойства исходной композиции: приводит к увеличению вязкости реакционноспособной композиции и увеличению плотности изделий, причем модификация методом нанесения огнезащитного покрытия не влияет на технологические и физико-механические свойства конечного изделия и позволяет получить группу горючести Г1-Г2 в зависимости от концентрации ОТГ.

Ключевые слова: пенополиуретан, горючесть, пожарная опасность, антипирен, окисленный терморасширяющийся графит, огнезащитное покрытие.

Для цитирования: Бруяко М.Г., Липка П.А., Калинина М.С. Теплоизоляционные изделия на основе модифицированного пенополиуретана с огнезащитным покрытием // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-14-19>

M.G. BRUYAKO, Candidate of Sciences (Engineering), (mbruyako@yandex.ru), P.A. LIPKA, Graduate student (petr.lipka2020@gmail.com),

M.S. KALININA, Bachelor (manyasha.kms@mail.ru)

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

Thermal Insulation Products Based on Modified Polyurethane Foam with Fire-Resistant Coating

As part of the study, thermal insulation products based on rigid polyurethane foam (PPU) with a reduced flammability group were obtained. The effect of modification of polyurethane foam with oxidized thermally expansive graphite (OTG) on physical, mechanical and fire hazard properties was studied. A two-component factory-ready system with a G4 flammability group was used as the initial composition for modification. OTG brand: KR 350-80 was used as a modifier, characterized by a degree of expansion of at least 370 ml/g, a temperature of the onset of expansion of 170°C. Products made from polyurethane foam were modified by the method of dispersing OTG in a reactive composition, as well as by applying a fire-retardant coating during injection molding of masses. Samples were made and tests were carried out to determine the flammability group in accordance with GOST 30244. It was established that an increase in the concentration of OTG in the fire retardant coating and the structure of the material reduces the flammability of products, while modification by the dispersion method makes it possible to obtain a material with a flammability group (G3), but has an effect on the technological properties of the initial composition, leads to an increase in the viscosity of the reactive composition and an increase in the density of the products, while the modification of the fire retardant coating with honey does not affect the technological and physical-mechanical properties of the final product, and makes it possible to obtain a flammability group G1-G2 depending on the concentration of OTG.

Keywords: polyurethane foam, flammability, fire hazard, fire retardant, oxidized thermally expanding graphite, fire retardant coating.

For citation: Bruyako M.G., Lipka P.A., Kalinina M.S. Thermal insulation products based on modified polyurethane foam with a fire retardant coating. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 14–19. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-14-19>

Ежегодный рост производства полимерных теплоизоляционных изделий (Polyols Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022–2027 <https://www.imarcgroup.com/polyols-market>; Polyurethane Foam Market to Grow at a CAGR of 7.40% & Surpass USD 70 Billion by 2028. <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/05/04/2435901/0/en/Polyurethane-Foam-Market-to-Grow-at-a-CAGR-of-7-40-Surpass-USD-70-Billion-by-2028-BlueWeave-Consulting.html>), обусловленный концепцией энергосбережения, закрепленной в Федеральном законе «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от

23.11.2009 № 261-ФЗ, ставит задачу перед научным сообществом о снижении воздействия существенного недостатка полимерных материалов – горючести [1] с целью снижения экономических убытков вследствие пожаров, размер которых достигает до 2% ВВП в развитых странах, а также расширения спектра применения данных материалов.

Анализ рынка современной полимерной теплоизоляции позволил выявить материал – ППУ, обладающий закрытой ячеистой пористостью, теплопроводностью 0,023–0,028 при плотности 35–50 кг/м³ и температурой эксплуатации от -170 до 150°C. Совокупность данных эксплуатационных и физико-механических свойств в сравнении с существующими

ми аналогами обеспечили широкое применение теплоизоляционных изделий на его основе [2, 3].

Анализ современных публикаций позволил выявить работы, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик, снижение теплопроводности [4, 5]. А также рост количества исследований по снижению пожарной опасности [6, 7].

Термическая деструкция полимерных материалов является сложным процессом, который до конца не изучен. В упрощенной форме выделяют взаимосвязь реакций тепло- и массопередачи конденсированной и газообразной фаз термической деструкции материала в пламенной и предпламенной зонах горения, управление которыми дает возможность регулировать пожароопасные свойства [8, 9].

Существует метод снижения пожарной опасности химической модификацией исходных компонентов реакционноспособными модификаторами, которые в процессе поликонденсации вшиваются в сетчатую структуру ППУ. Так, в работе [10] описан вариант использования фосфорсодержащего полиола для создания умеренногорючих жестких ППУ. Авторы применяют оксиэтилированный тетраалкилфосфонат пентаэретрита (фостетрол-1), который содержит 14,7–15,2% фосфора и 10,1–10,7% гидроксильных групп. С целью снижения токсичности дыма дополнительно вводят Cu_2O , $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или шпинели хрома. Полученные ППУ характеризуются значением КИ 27,8–28,6 об. %, плотностью 43–50 кг/м³, группой горючести Г2 по ГОСТ 30244. В работе [11] описан вариант применения бромсодержащего полиола, который позволяет получить самозатухающие ППУ с КИ 27,5 об. %. В работе [12] предложен синтез фосфорсодержащего полиолафосфотриметанола (ФТМ), позволяющий при введении в количестве 10–15 мас. ч. повысить значение кислородного индекса с 17 об. % до 22,5–23 об. %.

Общим недостатком данного метода является влияние модификатора на физико-механические и эксплуатационные свойства конечного материала и изделий на его основе, а также повышение токсичности продуктов горения.

Существует метод, основанный на введении активных и инертных антипиренов, их композиций в структуру материала. Так, в работах [13–17] описаны способы модификации красным фосфором, эфирами фосфорной кислоты (трихлорэтилфосфат, трис (2-хлоризопропил) фосфат, трифенилфосфат или трис (2-хлорэтил) фосфат), гидроксидом алюминия или магния, боратом цинка и полифосфатом аммония, а также оксидом сурьмы с бромсодержащими антипиренами, борной кислотой и гидроксидами металлов, полифосфатом аммония, или производными меламинна совместно с циклическим фосфатом (неопентилфенилфосфат), что позволяет получить трудногорючие ППУ.

Общим недостатком данного метода является необходимость введения сравнительно большого количества модификатора, влияющего на технологические

характеристики исходных компонентов реакционноспособной композиции, а также на физико-механические и эксплуатационные свойства конечного материала. Также существенным недостатком, ограничивающим спектр применения, модифицированного ППУ и изделий на их основе, по санитарно-гигиеническим параметрам является диффузия активных антипиренов в процессе эксплуатации к поверхностному слою.

Существует метод, основанный на создании защитного покрытия на поверхности материала, с целью предотвращения воздействия на него открытого пламени, распространения температурного поля и поступления окислителя в зону горения.

Так, в работе [18] рассмотрен способ формирования защитного покрытия на основе альгината/глинистого аэрогеля. В зависимости от толщины защитного слоя достигаются значения кислородного индекса (КИ) от 32 до 60 об. %, в то время как базовый образец ППУ характеризуется значением КИ 17 об. %. Образцы обладают хорошей термической стабильностью, температура начала разложения выше 240°C.

В патенте [19] автором приведен состав многослойной панели на основе ППУ, включающий огнестойкий слой из ОТГ с содержанием в диапазоне от 50 до 500 г/м² по поверхности.

Также в работах [20–22] приведены примеры модификации ППУ ОТГ инертным экологически безопасным интумасцентным антипиреном, принцип которого основан на многократном расширении из-за перехода интеркалета в газовую фазу вследствие термоудара, который, расширяясь, раздвигает чешуйки графита, создавая при этом коксовый теплоизоляционный слой, предотвращающий воздействие теплового поля на материал. Температура начала вспучивания ОТГ составляет от 150°C, при этом температурой максимальной степени расширения является 600–1000°C, характерная для воздействия открытого пламени при пожаре. Кратность вспенивания ОТГ лежит в диапазоне от 50 до 400.

В данной работе для модификации ППУ был выбран ОТГ и исследовано его влияние на физико-механические и пожароопасные свойства.

Материалы и методы

В качестве сырьевых компонентов для проведения исследовательских работ были выбраны:

– изоцианат марки Voranate M 229, жидкость плотностью 1,24 г/см³, вязкость 190 МПа·с при температуре 25°C, содержание NCO – 30–32%;

– полиольная композиция марки Изолан-350Н, жидкость плотностью 1,2 г/см³, вязкость 140 МПа·с при температуре 25°C;

– графит окисленный терморасширяющийся (производитель Химпэк) марки КР 350-80 с содержанием углерода 95,62%, содержанием золы 3,62%, содержанием влаги 0,75%, степенью расширения минимум 370 мл/г, наступлением расширения при температуре 170°C, рН – 6;

– силиконовый разделительный состав разового действия на органических растворителях. Пента-120-11 – состав на основе силиконовых полимеров в органических растворителях. Работоспособен до 130°C. Состав коррозионно неактивен, хорошо растворяется в органических и углеводородных растворителях ароматического ряда.

Определение кажущейся плотности пенопластов проводилось по ГОСТ 409–2017 «Пластмассы ячеистые и резины губчатые. Метод определения кажущейся плотности».

Определение горючести ППУ определялось по ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть».

В работе исследовалось влияние модификации на технологические характеристики вспениваемой массы и на конечные свойства полученных пенопластов, диспергированных графитом, а также с нанесенным огнезащитным слоем из графита.

Результаты исследования

Процесс производства ППУ по технологии литьевого формования сильно зависит от реологических характеристик сырьевых компонентов. Процесс заливки изделия связан со значительными ограничениями во времени, в связи с чем возникает необходимость понижения значений вязкости олигомерной массы и отвердителя. Кроме того, более вязкая смесь оказывает большую нагрузку на насосы, качающие сырье, потому обеспечение большей подвижности смеси способно привести к снижению энергозатрат на ее подачу при производстве и меньшему износу оборудования. В связи с этим были выполнены исследования реологических характеристик исходных компонентов А и Б, модифицированных ОТГ.

Определение условной вязкости полиола марки Изолан 350Н производилось на вискозиметре ВЗ-6 в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ 9070–75* «Вискозиметры для определения условной вязкости лакокрасочных материалов. Технические условия». Испытания проводились при исходной температуре сырья 21°C. Были проведены исследования влияния введения ОТГ на реологические характеристики исходных сырьевых компонентов методом диспергирования в одном из компонентов композиции – полиоле, обладающем меньшей вязкостью по сравнению с изоцианатом, ОТГ со следующим содержанием в мас. % композиции: 0,5; 1; 1,25; 2,5; 4; 5; 7,5; 10; 15; 20.

В ходе эксперимента выявлялась условная вязкость. Результаты представлены на рис. 1.

Эксперимент показал, что дальнейшее увеличение концентрации негативно скажется на реологических свойствах компонента. Максимальной концентрацией графита было выбрано 20 мас. % полиола, при котором вязкость в сравнении с контрольным образцом увеличивается в три раза.

Наиболее предпочтительными по данному параметру для производства ППУ по заливочной технологии был принят полиольный компонент

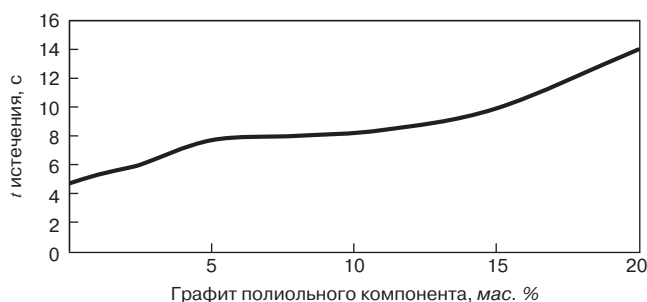


Рис. 1. Вязкость полиола в зависимости от количества введенного графита в процентном соотношении

Fig. 1. Polyol viscosity depending on the amount of introduced graphite as a percentage

Изолан-350, модифицированный ОТГ в мас. % композиции: 2,5; 5; 10.

При изготовлении полимерных строительных теплоизоляционных материалов ключевую роль играют процессы вспенивания и формирования структуры. Именно от взаимодействия этих двух показателей зависят основные свойства и характеристики будущего материала.

В соответствии с этим были произведены исследования физико-механических и эксплуатационных характеристик ППУ, модифицированных методом диспергирования ОТГ в реакциюноспособной смеси.

Испытания по определению кратности исходного сырья определялись согласно методике, указанной в ТУ 6-05-1104–78. В момент отчетливого начала подъема смеси фиксировался конец индукционного периода. Далее наблюдался резкий подъем смеси, сопровождающийся сильной экзотермией, при этом температура вспенивающейся композиции измерялась с помощью пирометра, по окончании чего фиксировался конец вспенивания. Ключевым моментом, показывающим конец реакции поликонденсации, считался момент отчетливого падения общей температуры смеси.

Для изучения вспенивающей способности использовался полиольный компонент, модифицированный ОТГ методом диспергирования с концентрацией в % по массе композиции: 0; 2,5; 5; 10.

В процессе исследования ключевыми фиксированными параметрами были: время (t) начала индукционного периода, мин; время (t) окончания индукционного периода, мин; время (t) окончания отверждения, мин; температура (T) в процессе вспенивания, °C; плотность, кг/м³. Значения данных показателей представлены в табл. 1.

Полученные данные показывают увеличение t окончания отверждения от 13 до 22%, а также увеличение плотности от 16 до 22% ППУ, в зависимости от увеличения концентрации модифицирующей добавки. При этом ОТГ равномерно распределен по объему материала. На рис. 2 представлено распределение пластинок графита в пенополиуретановой композиции (увеличение $\times 50$).

С целью создания огнезащитного покрытия на основе ОТГ без ухудшения эксплуатационных харак-

Таблица 1
Table 1

Средние значения эксплуатационных и физико-механических характеристик пенополиуретана
Average values of operational and physical-mechanical characteristics of polyurethane foam

Графит, мас. % от комп.	t начала индукционного периода, мин	t окончания индукционного периода, мин	t окончания отверждения, мин	T в процессе вспенивания, °С	Плотность, кг/м ³
0	0:35	2:10	3:40	65	38
2,5	0:27	2:30	4:10	62	44,3
5	0:33	2:15	4:30	63	46,5
10	0:38	2:50	4:10	66	46,2

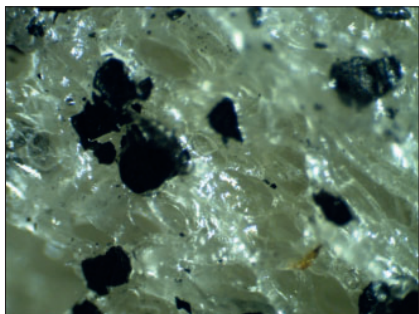


Рис. 2. Структура ППУ, модифицированного ОТГ с концентрацией 10 мас. %
Fig. 2. Structure of polyurethane foam modified with oxidized thermally expansive graphite with a concentration of 10 wt. %

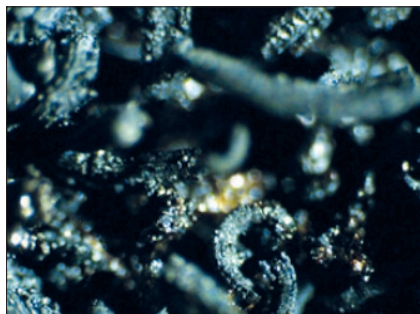


Рис. 3. Структура вспученного ОТГ в ППУ матрице
Fig. 3. Structure of expanded oxidized thermally expanding graphite in a polyurethane foam matrix

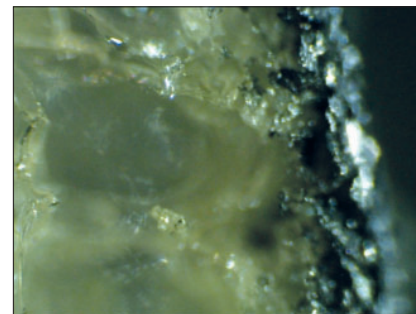


Рис. 4. Структура зоны раздела огнезащитного покрытия с чистым ППУ
Fig. 4. Structure of the interface zone of a fire retardant coating with pure polyurethane foam

Таблица 2
Table 2

Пожароопасные характеристики модифицированного пенополиуретана
Fire characteristics of modified polyurethane foam

Концентрация графита	Потери массы, %	l повреждения, %	t самостоятельного горения, мин	T тления, °С	t горения, мин	T дымовых газов, °С
0%	77,5	100	0	0	1	294
2,5%	60,5	100	0	0	1:50	287
5%	49,5	100	0	0	1:50	222
10%	12,2	100	0	0	1:30	203
0%	77,5	100	0	0	1	294
31,25 г/м ²	5,1	84	0	0	0	86
62,5 г/м ²	5,9	70	0	0	0	81
90 г/м ²	2,9	20	0	0	0	75

теристик материала был предложен способ получения огнезащитного слоя из графита на поверхности изделий из ППУ при литьевом формовании масс методом распыления композиции на основе разделительного состава Пента-120-11 и ОТГ на внутреннюю поверхность формы. После этого в форму заливалась смесь компонента А и Б.

Были испытаны составы со следующим расходом графита, г/м²: 31,25; 62,5; 90; 100. При этом 90 г/м² является оптимально предельным значением; дальнейшее увеличение концентрации без дополнительных материально-технических затрат неэффективно, так как излишки графита свыше 90 г/м² остаются на форме.

С целью исследования закономерности модифицирования ППУ ОТГ, влияющей на горючесть изделий, полученных методом литьевого формования, были проведены испытания по определению горючести по ГОСТ 30244–94.

Были испытаны образцы пенополиуретанового материала, модифицированного методом диспергирования ОТГ. Также были испытаны образцы пенополиуретановых изделий с огнезащитным слоем из ОТГ, полученным методом распыления композиции на основе разделительного состава Пента-120-11 и ОТГ.

В процессе исследования ключевыми фиксированными параметрами были: потери массы в % от исходной; l повреждения в % от исходной; время (t) самостоятельного горения, мин; время (t) тления, мин; время (t) горения под воздействием источника огня, мин; температура (T) отходящих дымовых газов, °С, значения которых приведены в табл. 2

В результате проведенных исследований установлено, что с ростом степени наполнения композиции реакционноспособных олигомеров ОТГ до 10 мас. % у образцов модифицированного ППУ снижается потеря по массе от исходной с 77,5 до 12,2%; темпера-

тура отходящих дымовых газов снижается от исходной на 31% с 294 до 203°C; также выявлено, что с ростом концентрации ОТГ огнезащитного покрытия до 90 г/м² у образцов закономерно снижается потеря массы на 96% от 77,5 до 2,9%; температура отходящих дымовых газов снижается от исходной на 74% с 294 до 75°C; длина повреждения от исходной на 80% от 100 до 20%.

Данные результаты позволяют отнести образцы с огнезащитным покрытием с концентрацией графита 90 г/м² к группе горючести Г1 по ГОСТ 30244, а образцы с концентрацией 31,25 и 62,5 г/м² – к группе горючести Г2. Это позволяет расширить спектр использования данных изделий.

Обсуждение

Механизм термической деструкции ППУ модифицированного методом диспергирования ОТГ в реакционноспособную композицию, протекает следующим образом. В зоне воздействия пламени на материал происходит одновременное выгорание ППУ с дальнейшей его карбонизацией и вспучивание ОТГ в матрице. При этом концентрации ОТГ в матрице недостаточно для полного предотвращения воздействия температурного поля и поступления окислителя в зону горения. На рис. 3 представлена структура вспученного ОТГ в ППУ матрице, подвергнутого воздействию пламени при увеличении $\times 50$. Проанализировав рис. 3, можно увидеть значительное увеличение объема ОТГ в перпендикулярном направлении, что и является основным принципом работы данного антипирена интумесцентного типа действия.

При этом термическая деструкция ППУ с огнезащитным покрытием из ОТГ в зоне воздействия пламени имеет следующий характер: ППУ в контактной зоне с покрытием (рис. 4), после его вспучивания и нагревания до температуры начала термической деструкции ППУ постепенно карбонизируется до выгорания на глубину, при которой воздушная прослойка обеспечивает достаточные теплоизолирующие свойства огнезащитного покрытия. При этом термическая деструкция беспламенная и идет по механизму пиролиза.

Таким образом, использование ОТГ эффективно для снижения горючести полимерных композиций на основе пенополиуретана и является перспективным направлением в отрасли производства строительных материалов.

Выводы

Использование ОТГ для модификации ППУ методом диспергирования в исходной реакционноспособной композиции позволяет снизить горючесть и управлять физико-механическими характеристиками материала. При этом метод модификации ППУ путем нанесения огнезащитного покрытия из ОТГ позволяет добиться снижения исключительно пожароопасных свойств, не влияя на внутренние свойства

материала изделия. Комплексная модификация дает возможность получить изделия и материалы широкого спектра свойств.

Список литературы / References

1. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
1. Aseeva R.M., Zaikov G.E. Gorenije polimernykh materialov [Combustion of polymer materials]. Moscow: Nauka. 1981. 280 p.
2. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Iss. 10, pp. 2549–2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
3. Гравит М.В., Кулешин А.С., Беляева С.В. Национальные стандарты для жестких напыляемых PUR и PIR пен // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 58–64.
3. Gravit M.V., Kuleshin A.S., Belyaeva S.V. National standards for rigid sprayed PUR and PIR foams. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 10, pp. 58–64. (In Russian).
4. Кочерженко А.В., Марушко М.В., Рябчевский И.С. Пенополиуретановая теплоизоляция с улучшенными эксплуатационными свойствами. *Научные технологии и инновации: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова*. Белгород. 29 апреля 2019. С. 84–88.
4. Kocherzhenko A.V., Marushko M.V., Ryabchevsky I.S. Polyurethane foam thermal insulation with improved performance properties. *High-tech technologies and innovations: Collection of reports of the International scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov*. Belgorod. April 29, 2019, pp. 84–88. (In Russian).
5. Кочерженко А.В. Получение наполненного пенополиуретана с улучшенными эксплуатационными свойствами // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 4. С. 47–52. DOI: 10.34031/article_5cb1e65f6791b0.52319300
5. Kocherzhenko A.V. Obtaining filled polyurethane foam with improved performance properties. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 4, pp. 47–52. (In Russian). DOI: 10.34031/article_5cb1e65f6791b0.52319300
6. Захарченко А.А. Изучение термоокислительной деструкции и горения модифицированных пенополиуретанов. XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: Сборник материалов конференции. Волгоград. 16–28 ноября 2021. С. 6–7.
6. Zakharchenko A.A. Study of thermal-oxidative destruction and combustion of modified polyurethane foams. *XXVI Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region: collection of*

- conference materials. Volgograd. November 16–28, 2021, pp. 6–7. (In Russian).
7. Патент № 2726212 С1 Российская Федерация, МПК С08G 18/48, С08G 18/76, С08К 5/49. *Композиция для получения жесткого пенополиуретана пониженной горючести*: № 2019141894 / Захарченко А.А., Шокова Д.В., Ваниев М.А. и др. Заявл. 17.12.2019. Оpubл. 09.07.2020.
 7. Patent No. 2726212 С1 Russian Federation, IPC С08G 18/48, С08G 18/76, С08К 5/49. *Kompozitsiya dlya polucheniya zhestkogo penopoliiuretana ponizhennoy goryuchesti* [Composition for producing rigid polyurethane foam of reduced flammability]: No. 2019141894 / Zakharchenko A.A., Shokova D.V., Vaniev M.A. and others. Appl. 12/17/2019. Publ. 07/09/2020. (In Russian).
 8. Каблов В.Ф., Новопольцева О.М., Кочетков В.Г., Лапина А.Г. Основные способы и механизмы повышения огнетеплозащитной стойкости материалов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2016. № 4 (183). С. 46–60.
 8. Kablov V.F., Novopoltseva O.M., Kochetkov V.G., Lapina A.G. Basic methods and mechanisms for increasing the fire and heat resistance of materials. *Izvestiya of the Volgograd State Technical University*. 2016. No. 4 (183), pp. 46–60. (In Russian).
 9. Халтуринский Н.А., Рудакова Т.А. Физические аспекты горения полимеров и механизм действия ингибиторов // *Химическая физика*. 2008. Т. 27. № 6. С. 73–84.
 9. Khalturinsky N.A., Rudakova T.A. Physical aspects of polymer combustion and the mechanism of action of inhibitors. *Khimicheskaya fizika*. 2008. Vol. 27. No. 6, pp. 73–84. (In Russian).
 10. Ушков В.А., Сокорева Е.В., Славин А.М., Орлова А.М. Пожарная опасность резольных пенофенопластов и жестких пенополиуретанов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 5. С. 65–68.
 10. Ushkov V.A., Sokoreva E.V., Slavin A.M., Orlova A.M. Fire hazard of resole foam phenolic plastics and rigid polyurethane foams. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2014. No. 5, pp. 65–68. (In Russian).
 11. Guo H., Gao Q., Ouyang C.F. Research on properties of rigid polyurethane foam with heteroaromatic and brominated benzyl polyols. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. Vol. 132 (33) DOI: 10.1002/APP.42349
 12. Ming-Jun Chen, Chun-Rong Chen, Yi Tan, Jian-Qian Huang. Inherently flame-retardant flexible polyurethane foam with low content of phosphorus-containing cross linking agent // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 53. Iss. 3, pp. 1160–117. <https://doi.org/10.1021/ie4036753>
 13. Method for producing flame-retardant polyurethane foam materials having good long-term use properties: Int. Cl. C 08 G 18/409/ Klesczeowski B., Otten M., Meyer-Ahrens S.; Covestro Deutschland AG. CA2767469 (A1); Appl. 2010.07.06; Publ. 2011.01.13.
 14. Two-component polyurethane/vinyl ester hybrid foam system and its use as a flame retardant material and material for filling openings in buildings with foam: Int. Cl. C 08G 18/638 / Reinheimer A.; Hilti AG. US2008132593 (A1); Appl. 2007.11.28; Publ. 2012.07.10.
 15. Halogen-free flame-retardant microcellular foam polyurethane material: Int. Cl. C 08 J 9/06/Z / Rongdong L. Yue; Dongguan Antuopu Plastic Polymer Technology Co., Ltd. CN105802193 (A); Appl. 2016.05.31; Publ. 2016.07.27.
 16. Composition for flame-retardant flexible polyurethane foam: Int. Cl. C 08 G 18/4829 / Tokuyasu N., Hamada T.; Daihachi Chem Ind. MY139727 (A); Appl. 2003.11.06; Publ. 2009.10.30.
 17. Polyurethane foam containing flame-retardant mixture: Int. Cl. C 08 G 18/3851 / Weihong L., Petrovsky A., Stoel G.K., Levchik S., Yinzhong G.; Sopresta LLC. CN101616945 (A); Appl. 2007.11.19; Publ. 2009.12.30.
 18. Chen H. etc. Highly efficient flame retardant polyurethane foam with alginate/clay aerogel coating. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8 (47), pp. 32557–32564. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11659>
 19. Патент RU2616639C2. *Строительная изоляционная панель и способ ее изготовления* / ФАОТТО Уго (ИТ). Патентообладатель СИЛЬКАРТ С.П.А. (ИТ). Заявка: 2015129825, 27.12.2012. Оpubл. 18.04.2017. Бюл. № 11.
 19. Patent RU2616639C2. *Stroitel'naya izolyatsionnaya panel' i sposob yeye izgotovleniya* [Construction insulating panel and method of its manufacture]. Faotto Ugo (IT). Patent holder SILKART S.P.A. (IT). Appl.: 2015129825, 12/27/2012. Publ. 04/18/2017. Bull. No. 11.
 20. Zhao B. and etc. Bi-phase flame-retardant actions of water-blown rigid polyurethane foam containing diethyl-N,N-bis(2-hydroxyethyl) phosphoramidate and expandable graphite. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017. Vol. 124, pp. 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.032>
 21. Xi W. and etc. Addition flame-retardant behaviors of expandable graphite and [bis(2-hydroxyethyl)amino]-methyl-phosphonic acid dimethyl ester in rigid polyurethane foams. *Polymer Degradation and Stability*. 2015. Vol. 122, pp. 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.10.013>
 22. Шафигуллин Л.Н., Романова Н.В., Шафигуллина Г.Р. Исследования влияния терморасширяющегося графита на свойства пенополиуретана // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2021. № 2 (88). С. 158–167.
 22. Shafigullin L.N., Romanova N.V., Shafigullina G.R. Research on the influence of thermally expanding graphite on the properties of polyurethane foam. *Sotsial'no-ekonomicheskkiye i tekhnicheskkiye sistemy: issledovaniye, proyektirovaniye, optimizatsiya*. 2021. No. 2 (88), pp. 158–167. (In Russian).

В.Г. СОЛОВЬЕВ, канд. техн. наук (solovevvg@mgsu.ru),
Е.В. МАТЮШИН, преподаватель (matyushinev@mgsu.ru),
Л.И. ЕФИШОВ, преподаватель (efishovli@mgsu.ru)

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

Влияние вида и объемного содержания стальной фибры на прочность сверхвысокопрочного сталефибробетона при сжатии

Приведены результаты определения прочности при сжатии различных составов сверхвысокопрочного сталефибробетона (СВФБ) с объемным содержанием фибры от 1 до 3%. Было использовано четыре вида фибры: волновая размером 15/0,3 и 22/0,3 мм, прямая 13/0,3 мм и анкерная 30/0,5 мм. Установлено, что волновая и анкерная фибра приводит к повышению прочности при сжатии на 10–30 МПа при увеличении ее содержания с 1 до 3%. Фибра прямого профиля не оказывает заметного влияния на механические свойства фибробетона. Получены эмпирические уравнения для прогнозирования прочности СВФБ при сжатии в зависимости от прочности бетона-матрицы, геометрических размеров и содержания дисперсного армирования для составов с волновой и анкерной фиброй. Установлено, что увеличение объемного содержания заполнителя в составе бетонной матрицы с 0,2 до 0,4 м³/м³ приводит к повышению прочности при сжатии СВФБ. Прочность образцов с волновой фиброй увеличилась на 5,3–13,3 МПа, с анкерной – на 14–19,3 МПа, с прямой – на 5–7 МПа. Наиболее интенсивный рост механических характеристик вследствие повышения доли заполнителя в составе наблюдается при большем процентном содержании фибры.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный сталефибробетон, стальная фибра, заполнитель, уравнения прогнозирования прочности.

Для цитирования: Соловьев В.Г., Матюшин Е.В., Ефишов Л.И. Влияние вида и объемного содержания стальной фибры на прочность сверхвысокопрочного сталефибробетона при сжатии // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 20–27.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-20-27>

V.G. SOLOVIEV, Candidate of Sciences (Engineering) (solovevvg@mgsu.ru), E.V. MATIUSHIN, Lecturer (matyushinev@mgsu.ru), L.I. EFISHOV, Lecturer (efishovli@mgsu.ru)

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

Influence of Type and Volume Content of Steel Fiber on the Compressive Strength of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete

The paper presents the results of determining the compressive strength of various compositions of Ultra-High Performance Fiber Reinforced concrete (UHPRFC) with fiber volume content from 1 to 3%. Four types of fibers were used: corrugated fiber of 15/0.3 mm and 22/0.3 mm, straight fiber of 13/0.3 mm and hooked-end fiber of 30/0.5 mm. It was found that corrugated and hooked-end fiber leads to an increase in compressive strength by 10–30 MPa when its content is increased from 1 to 3%. Straight fiber has no noticeable effect on the mechanical properties of UHPRFC. Empirical equations for predicting the compressive strength of UHPRFC depending on the strength of concrete matrix, geometric dimensions and content of dispersed reinforcement for compositions with corrugated and hooked-end fibers have been obtained. It is found that increasing the volume content of aggregate in the concrete matrix composition from 0.2 to 0.4 m³/m³ leads to an increase in the strength of UHPRFC. The strength of specimens with corrugated fiber increased by 5.3–13.3 MPa, with hooked-end fiber – by 14–19.3 MPa, with straight fiber – 5–7 MPa. It is also noted that the most intensive growth of mechanical characteristics due to the increase in the aggregate volume content in the composition is observed at a higher percentage of fiber volume fraction.

Keywords: Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, steel fiber, aggregate, strength prediction equations.

For citation: Soloviev V.G., Matiushin E.V., Efishov L.I. Influence of type and volume content of steel fiber on the compressive strength of ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 20–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-20-27>

Одной из тенденций в строительной отрасли последних десятилетий является повышение долговечности и надежности строительных конструкций, в том числе за счет применения новых материалов. Самым массовым конструкционным строительным материалом является бетон, в связи с чем исследователями по всему миру вводится непрерывная работа по изучению и улучшению его свойств. Одним из наиболее современных типов бетонов является сверхвысокопрочный сталефибробетон (СВФБ), который в зарубежной научной и технической литературе носит название Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC). СВФБ обладает всеми положительными качествами, которые присущи самоуплот-

нящимся, высокопрочным и высокофункциональным бетонам [1–3]. Прочность при сжатии данного материала находится в диапазоне 150–220 МПа [4–6], на осевое растяжение – 8–21 МПа [7–11] в зависимости от состава бетонной матрицы, вида и объемного содержания стальной фибры. В свежеприготовленном состоянии СВФБ, как правило, является самоуплотняющимся, что позволяет снизить продолжительность и трудоемкость бетонирования конструкций, а также регулировать коэффициент ориентации фибры в пространстве. Это возможно за счет того, что фибра ориентируется параллельно движению потока смеси таким образом. На сегодняшний день наиболее рациональной областью применения

СВФБ является строительством транспортной инфраструктуры, где данный класс материалов используется для изготовления пролетных строений мостов [12], заделки стыков между сборными железобетонными элементами [13], устройства упоров для преднапрягаемой арматуры [14], а также для ремонта поврежденных стальных и железобетонных элементов строительных конструкций [15].

Свойства СВФБ, как любого композиционного материала, определяются свойствами матрицы, видом и объемным содержанием фибры, а также прочностью сцепления поверхности волокон с бетонной матрицей. За более чем 20 лет исследования сверхвысокопрочного бетона различными авторами были сформулированы общие требования к составу бетонной матрицы, обеспечивающие достижение заданных механических характеристик. Основной идеей подбора состава матрицы для СВФБ является повышение плотности структуры путем снижения капиллярной пористости и увеличения плотности упаковки частиц. Это реализуется за счет снижения водоцементного соотношения до 0,18–0,3, а также использования активных и инертных минеральных добавок, суммарное содержание которых может достигать 60% от массы цемента. Прочность сцепления поверхности фибры с бетонной матрицей зависит как от профиля фибры, так и от состава бетонной матрицы. Наиболее распространенными являются волокна прямого и волнового профиля, а также прямые фибры с отгибами-анкерами на концах. В работах [9, 16–18] было установлено, что прочность сцепления фибры с СВФБ составляет: прямого профиля – 5–11 МПа; волновой – 11 МПа; анкерной – 17–27 МПа. Волокна с деформированным профилем имеют значительно большую прочность сцепления, так как, помимо адгезионных химических связей, выдергиванию волокна из бетона препятствует механическая анкеровка. Другим способом повышения прочности сцепления является увеличение содержания заполнителя в составе СВФБ. В работе [19] установлено, что при увеличении цементно-песчаного соотношения с Ц:П=1 до 1,5 прочность сцепления прямой фибры увеличилась на 4–5 МПа, спиральной – на 4–7 МПа. Увеличение объемного содержания заполнителя в составе СВФБ является эффективным методом улучшения механических свойств материала, а также снижения расхода наиболее дорогостоящих компонентов, таких как цемент и минеральные добавки, что было показано в предыдущих работах авторов на примере СВФБ с волновой фиброй [20, 21].

На сегодняшний день отсутствует единая методика подбора состава СВФБ с заданными свойствами. В подавляющем большинстве случаев проектирование состава опирается лишь на общие рекомендации, обобщенные по результатам испытаний различных исследователей. Целью данной работы было изучение совместного влияния вида и объемного содержания стальной фибры, а также количества

Таблица 1
Table 1

Свойства применяемого цемента
Properties of cement used

Свойство	Значение	
Нормальная густота, %	26,4	
Начало схватывания, мин	205	
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	53,6	
Истинная плотность, кг/м ³	3105	
Минералогический состав	C ₃ S, %	61,7
	C ₂ S, %	13,1
	C ₃ A, %	6,2
	C ₄ AF, %	15,4

Таблица 2
Table 2

Физические свойства инертных компонентов
Physical properties of inert components

Компонент	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³
Кварцевый песок 0,1–0,4	1403	2640
Кварцевый песок 0,4–0,8	1524	2630
Кварцевая мука	–	2650
Микрокремнезем	–	2200

заполнителя в составе на прочность при сжатии сверхвысокопрочного сталефибробетона. В результате анализа данных были получены эмпирические уравнения, которые могут служить первым шагом на пути к созданию методики расчета составов СВФБ.

Материалы и методы

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н. В качестве заполнителя использовался фракционированный кварцевый песок фракций 0,1–0,4 и 0,4–0,8 мм в соотношении 30:70, обеспечивающем максимальную плотность упаковки частиц в насыпном состоянии. В качестве активной минеральной добавки применялся уплотненный микрокремнезем МКУ-85, соответствующий требованиям ГОСТ Р 58894–2020 «Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия». Кварцевая мука с удельной поверхностью 429,6 м²/кг использовалась в качестве инертного наполнителя. Удобоукладываемость сталефибробетонных смесей регулировалась при помощи суперпластифицирующей добавки на основе эфиров поликарбоксилатов MasterGlenium 115. Основные свойства цемента и инертных компонентов представлены в табл. 1 и 2.

В работе использовались четыре типа стальной фибры. Внешний вид и параметры фибры представлены на рис. 1 и в табл. 3.

Были проведены испытания двух бетонных матриц, отличающихся объемным содержанием заполнителя, которое составляло 0,2 и 0,4 м³/м³. Водоцементное отношение, а также содержание микро-

Таблица 3
Table 3

Свойства стальной фибры
Properties of steel fiber

Условное обозначение	Вид фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Соотношение l_f/d_f	Временное сопротивление разрыву, МПа
В(15)	Волновая	15	0,3	50	≥ 1800
В(22)	Волновая	22	0,3	73	≥ 1800
А	Анкерная	30	0,5	60	≥ 1150
П	Прямая	13	0,3	43	≥ 1800

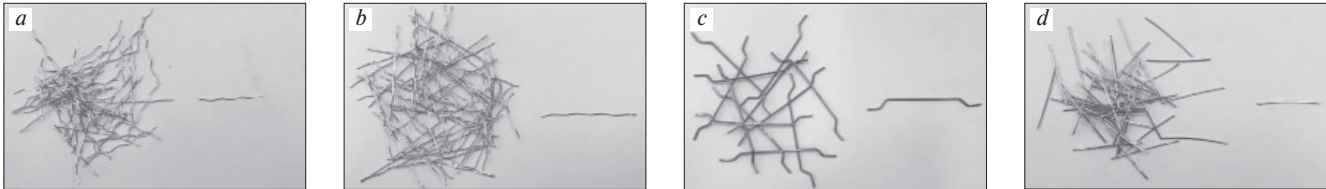


Рис. 1. Внешний вид стальной фибры: а – волновая фибра – В(15); б – волновая фибра – В(22); с – анкерная фибра – А; д – прямая фибра – П.
Fig. 1. Appearance of steel fiber: a – corrugated fiber – C(15); b – corrugated fiber – C(22); c – hooked-end fiber – H; d – straight fiber – S

кремнезема и кварцевой муки во всех составах не изменялись и составляли 26,5; 20 и 20% соответственно. Содержание стальной фибры составляло 1, 2 и 3% по объему. Составы с волновой фиброй В(22) были испытаны только при содержании заполнителя $V_3=0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ с целью исследования влияния соотношения l_f/d_f на прочностные характеристики СВФБ.

Расход суперпластификатора в фибробетонных смесях подбирался таким образом, чтобы обеспечить диаметр расплыва смеси на конусе Хегерманна (без механического воздействия) в диапазоне 170–200 мм для составов с анкерной фиброй, а в смесях с фиброй волнового и прямого профиля – 260–290 мм. Указанные диапазоны были выбраны, с одной стороны, с целью получения достаточно удобоукладываемой смеси, а с другой – предотвращения седиментации фибры под действием силы тяжести, что наблюдается при более высоких значениях диаметра расплыва для указанных типов волокон [22]. В табл. 4 представлены составы сталефибробетонных смесей с различным объемным содержанием фибры и заполнителя без учета суперпластификатора, содержание которого находилось в диапазоне 1,5–3% от массы цемента в зависимости от состава. Расход воды корректировался таким образом, чтобы обеспечить заданное водоцементное отношение с учетом содержания воды в пластифицирующей добавке.

Маркировка составов представлена в виде «X–Y–Z», где X – вид стальной фибры согласно табл. 3; Y – объемное содержание стальной фибры, %; Z – объемное содержание заполнителя, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Фибробетонные смеси приготавливались в автоматическом растворосмесителе в следующей последовательности: 1) перемешивание всех сухих компонентов в течение 1 мин; 2) добавление воды и пластифицирующей добавки, перемешивание в течение 2 мин; 3) остановка на 1 мин; 4) перемешивание смеси до однородного состояния в течение 3–8 мин; 5) добавление стальной фибры в течение 2 мин и последующее перемешивание в течение дополнитель-

ной 1 мин. Суммарное время перемешивания составляло от 10 до 15 мин.

Для проведения испытаний из фибробетонной смеси изготавливались образцы-кубы размером 50×50×50 мм. После формования образцы хранились в помещении лаборатории в течение двух суток, после чего подвергались тепловлажностной обработке в течение 48 ч при температуре 80°. После пропаривания образцы хранились трое суток в помещении лаборатории, после чего были испытаны.

Средняя плотность образцов определялась по ГОСТ 12730.1–2020 «Бетоны. Методы определения плотности», прочность при сжатии – по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Скорость нагружения при испытании образцов на сжатие составляла 2 МПа/с. Предел прочности отдельного образца определялся по формуле:

Таблица 4
Table 4

Составы сверхвысокопрочного сталефибробетона
Mix proportions of UHPFRC

Компонент	$V_3=0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$			$V_3=0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$		
	$V_f=1\%$	$V_f=2\%$	$V_f=3\%$	$V_f=1\%$	$V_f=2\%$	$V_f=3\%$
Цемент (Ц)	1050	1035	1021	783	769	756
Вода (В)	278	274	271	207	204	200
Микрокремнезём (МК)	210	207	204	157	154	151
Кварцевая мука (КМ)	210	207	204	157	154	151
Кварцевый песок 0,1–0,4	160	160	160	315	315	315
Кварцевый песок 0,4–0,8	370	370	370	740	740	740
Стальная фибра	78	156	234	78	156	234
МК/Ц	0,2					
КМ/Ц	0,2					
В/Ц	0,265					

$$R = \frac{F}{A}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь поперечного сечения образца, мм².

Значение средней плотности и прочности серии образцов определялось как среднеарифметическое значение результатов трех испытаний.

Результаты и обсуждение

В табл. 5 представлены результаты определения средней плотности и прочности при сжатии для 21 состава сверхвысокопрочного сталефибробетона.

На рис. 2 представлены значения средней плотности СВФБ в зависимости от вида и объемного содержания стальной фибры и заполнителя.

Вид фибры практически не оказывает влияния на среднюю плотность сталефибробетона. Увеличение средней плотности образцов наблюдается при увеличении объемного содержания стальной фибры и заполнителя. При $V_3=0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ плотность сталефибробетона находится в диапазоне 2341–2409, 2391–2441 и 2482–2516 кг/м³ при содержании стальной фибры 1, 2 и 3% соответственно. При $V_3=0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ плотность сталефибробетона находится в диапазоне 2400–2460, 2480–2500 и 2530–2620 кг/м³ при содержании стальной фибры 1, 2 и 3% соответственно. При увеличении содержания заполнителя значение плотности в среднем на 50–80 кг выше вследствие меньшего содержания воды в составе.

Таблица 5
Table 5

Результаты испытаний
Test results

Маркировка	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
В(15)-1-0,2	2409	155,8
В(15)-1-0,4	2460	163,4
В(15)-2-0,2	2435	177,8
В(15)-2-0,4	2500	161,1
В(15)-3-0,2	2510	169,5
В(15)-3-0,4	2594	191,1
В(22)-1-0,4	2431	166,4
В(22)-2-0,4	2485	178,3
В(22)-3-0,4	2598	193,2
А-1-0,2	2341	150
А-1-0,4	2427	156,2
А-2-0,2	2441	156
А-2-0,4	2490	171,2
А-3-0,2	2516	161,1
А-3-0,4	2602	180,4
П-1-0,2	2372	160,8
П-1-0,4	2427	165,8
П-2-0,2	2391	159,5
П-2-0,4	2481	165,5
П-3-0,2	2482	158,1
П-3-0,4	2530	165,3

На рис. 3 представлены значения прочности при сжатии СВФБ в зависимости от вида и объемного содержания стальной фибры и заполнителя.

Увеличение объемного содержания волновой и анкерной фибры приводит к увеличению прочности при сжатии вне зависимости от количества заполнителя в составе. В составах с $V_3=0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ при увеличении количества дисперсного армирования с 1 до 3% прочность СВФБ увеличилась с 155,8 до 177,8 МПа для волновой фибры В(15) и с 150 до 161,1 МПа для анкерной фибры. В составах с $V_3=0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ при увеличении количества дисперсного армирования с 1 до 3% прочность СВФБ увеличилась с 161,1 до 191,1 МПа для волновой фибры В(15), с 166,4 до 193,2 МПа для волновой фибры В(22) и с 163,8 до 180,4 МПа для анкерной фибры.

Увеличение объемного содержания фибры прямого профиля не привело к какому-либо значительному изменению прочности при сжатии. Наблюдается небольшое снижение прочности, которое лежит в пределах стандартного отклонения: в составах с $V_3=0,2 \text{ м}^3$ прочность уменьшилась с 161 до 158 МПа, а в составах с $V_3=0,4 \text{ м}^3$ – с 166 до 165 МПа. Полученные данные соответствуют результатам исследования авторов [23, 24]. В работе [23] увеличение содержания прямой фибры с $l_f/d_f=15/0,3$ мм с 1 до 2% привело к небольшому увеличению прочности с 146 до 150 МПа. В статье [24] использовалась прямая фибра с такими же геометрическими параметрами, что и в данной работе. Увеличение количества фибры с 1,3 до 2,3% выразилось в изменении кубиковой прочности при сжатии с 148 до 152,6 МПа. Мировой опыт показывает, что увеличение объемного содержания фибры прямого профиля может приводить к повышению прочности СВФБ до 46% относительно неармированной матрицы в зависимости от геометрических параметров волокон [5, 25, 26].

Наибольшее увеличение прочности СВФБ при сжатии наблюдается при использовании волновой фибры. Увеличение длины волновой фибры с 15 до 22 мм также приводит к повышению прочностных характеристик материала. Для сравнения составов с различным объемным содержанием стальной фибры различной геометрии для каждого состава был рассчитан фактор фибры, χ_f , по формуле:

$$\chi_f = V_f \cdot l_f/d_f, \quad (2)$$

где V_f – объемное содержание фибры, %; l_f , d_f – длина и диаметр фибры, мм.

Для сравнения полученных результатов с данными других авторов были построены графики зависимости относительной прочности фибробетона при сжатии $R_{отн}$ от фактора фибры. Относительная прочность определяется по формуле:

$$R_{отн} = \frac{R}{R_0}, \quad (3)$$

где R – прочность при сжатии фибробетона, МПа; R_0 – прочность при сжатии бетона-матрицы, МПа.

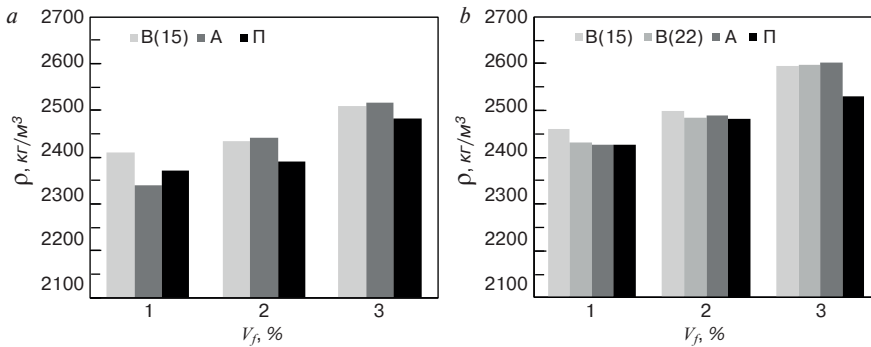


Рис. 2. Средняя плотность сталефибробетонов с различным объемным содержанием фибры: *a* – $V_{agg}=0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$; *b* – $V_{agg}=0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$
Fig. 2. Average density of steel fiber reinforced concretes with various fiber content: *a* – $V_{agg}=0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$; *b* – $V_{agg}=0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$

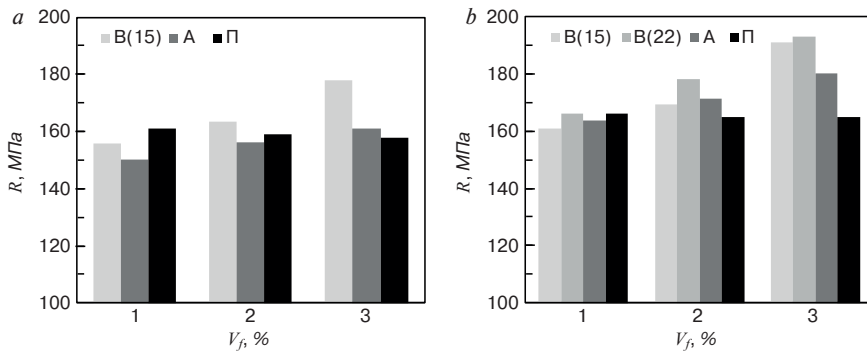


Рис. 3. Прочность при сжатии СВФБ с различным объемным содержанием фибры: *a* – $V_{agg}=0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$; *b* – $V_{agg}=0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$
Fig. 3. Compressive strength of steel fiber reinforced concretes with various fiber content: *a* – $V_{agg}=0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$; *b* – $V_{agg}=0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$

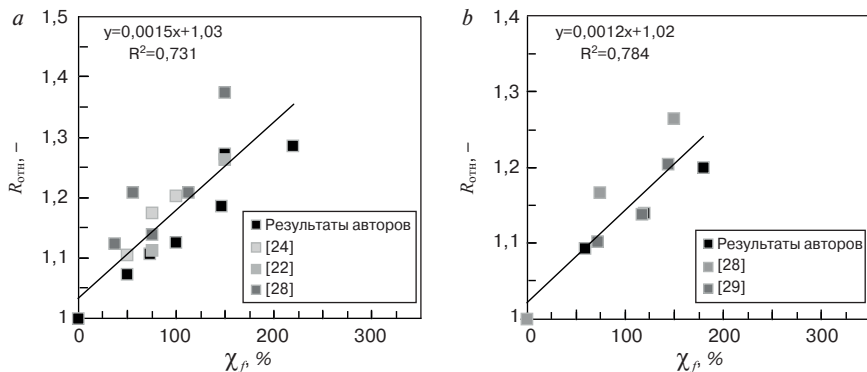


Рис. 4. Зависимость относительной прочности СВФБ при сжатии от фактора фибры: *a* – составы с волновой фиброй; *b* – составы с анкерной фиброй
Fig. 4. Relationship between relative strength of UHPFRC and fiber factor: *a* – mixtures with corrugated fiber; *b* – mixtures with hooked-end fiber

Прочность при сжатии бетона-матрицы определялась методом экстраполяции до значения $\chi_f=0$. На рис. 4 представлены графики зависимости относительной прочности от фактора фибры для составов с волновой и анкерной фиброй, построенные по результатам проведенных испытаний, а также данным из работ [20, 23, 24, 27, 28]. Для построения графиков были использованы результаты испытаний составов с объемным содержанием заполнителя $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$, так как данное значение является наиболее часто используемым для данного класса материалов.

Из приведенных графиков видно, что увеличение фактора фибры, χ_f , приводит к пропорциональному

увеличению относительной прочности СВФБ вне зависимости от типа фибры. Экспериментальные данные были аппроксимированы уравнением прямой ($y=a \cdot x+b$). Значения эмпирических коэффициентов *a*, *b* были определены методом наименьших квадратов. Значения коэффициента *b* равны 1,03 и 1,02 для составов с волновой и анкерной фиброй и для упрощения дальнейшего анализа были приняты равными единице. Таким образом, регрессионные уравнения примут следующий вид:

$$R_{отн} = a \cdot \chi_f + 1. \quad (4)$$

Значения коэффициента *a* для составов СВФБ с волновой фиброй выше, чем для анкерной фибры, и составляют 0,0015 и 0,0012 соответственно. Более высокое значение данного коэффициента означает, что при увеличении χ_f на единицу относительная прочность при сжатии СВФБ с волновой фиброй будет выше, чем с анкерной. Данный факт может объясняться различной геометрией волокон и соответственно различной прочностью сцепления с бетонной матрицей.

Заменяв относительную прочность в уравнении (4) на выражение (3), получим важное с практической точки зрения уравнение, которое может использоваться для прогнозирования прочности СВФБ с любым значением фактора фибры:

$$R = R_0 \cdot (a \cdot \chi_f + 1). \quad (5)$$

С точки зрения проектирования состава СВФБ наибольший интерес представляет вычисление объемного содержания фибры с заданными геометрическими характеристиками для получения требуемой прочности при сжатии:

$$V_f = \frac{R_f - R_0}{a \cdot R_0 \cdot l_f / d_f}, \% \quad (6)$$

Из рис. 4 также можно заметить, что составы, содержащие $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ заполнителя, имеют большую прочность при сжатии. На рис. 5 представлены графики зависимости прочности при сжатии СВФБ от объемного содержания заполнителя.

Прочность при сжатии СВФБ вне зависимости от типа фибры увеличивается при увеличении объемного содержания заполнителя в составе. Прочность образцов с волновой фиброй увеличи-

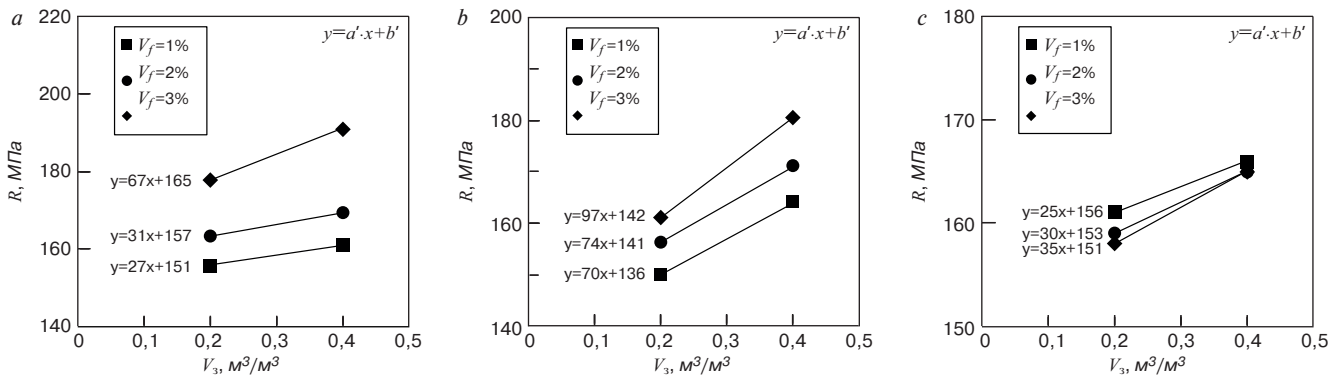


Рис. 5. Зависимость прочности при сжатии СВФБ от объемного содержания заполнителя: а – составы с волновой фиброй В(15); б – составы с анкерной фиброй; с – составы с прямой фиброй

Fig. 5. Relationship between compressive strength of UHPFRC and aggregate volume content: а – mixtures with corrugated fiber; б – mixtures with hooked-end fiber; с – mixtures with straight fiber

лась на 5,3–13,3 МПа, с анкерной – на 14–19,3 МПа, с прямой – 5–7 МПа.

В работах [29,30] приведены уравнения для вычисления прочности фибробетона при сжатии с точки зрения микромеханики разрушения композиционных материалов. Из представленных выражений следует, что разрушение фибробетона при осевом сжатии происходит вследствие начала сдвига трещины, расположенной под углом 45° к направлению действия сжимающей нагрузки. Сдвиг наклонной трещины приводит к образованию вертикальных трещин нормального отрыва, которые, объединяясь между собой, приводят к образованию магистральной трещины, в результате чего происходит разрушение материала. Таким образом, прочность фибробетона при сжатии, при прочих равных условиях, определяется его прочностью при растяжении. Также известно, что прочность фибробетона при растяжении определяется характером распределения и параметрами фибры по следующему уравнению [31]:

$$R_t = \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot \tau_f \cdot V_f \cdot l_f / d_f, \text{ МПа}, \quad (7)$$

где α_0 – коэффициент ориентации фибры в пространстве; α_1 – фактор эффективности фибры, зависящий от α_0 ; τ_f – прочность сцепления фибры с бетонной матрицей, МПа.

Из уравнения (7) следует, что если параметры α_0 , α_1 , V_f и l_f/d_f не изменяются, то увеличение прочности может быть связано с увеличением прочности сцепления фибры с бетоном, τ_f . Следовательно, рост прочности при сжатии СВФБ при увеличении объемного содержания заполнителя может объясняться увеличением числа контактов зерен с поверхностью стальной фибры, что в результате приводит к увеличению прочности сцепления волокна с бетоном.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 5, также были аппроксимированы уравнением прямой. При увеличении объемного содержания фибры увеличивается угол наклона линии к горизонтальной оси, что выражается в увеличении коэффициента a' (рис. 5). При изменении объема фибры с 1 до 3% значение коэффициента a' увеличилось с 27 до 67 для составов с волновой фиброй, с 70 до 97 для составов с анкерной фиброй и с 25 до 35 для составов с прямой фиброй. На графике рис. 5 показано, как изменяется коэффициент a' при различном объемном содержании фибры.

Наибольшее значение коэффициента a' было обнаружено у составов с анкерной фиброй, наименьшее – с прямой, что, наиболее вероятно, обусловлено геометрией волокон.

Рост величины коэффициента a' говорит о том, что при большем объемном содержании фибры единица объема заполнителя оказывается более эффек-

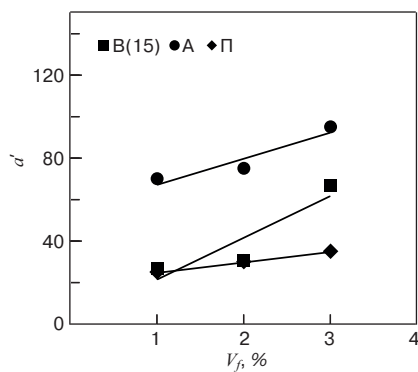


Рис. 6. Изменение параметра a' в зависимости от объемного содержания фибры

Fig. 6. Variation of parameter a' as a function of fiber volume content

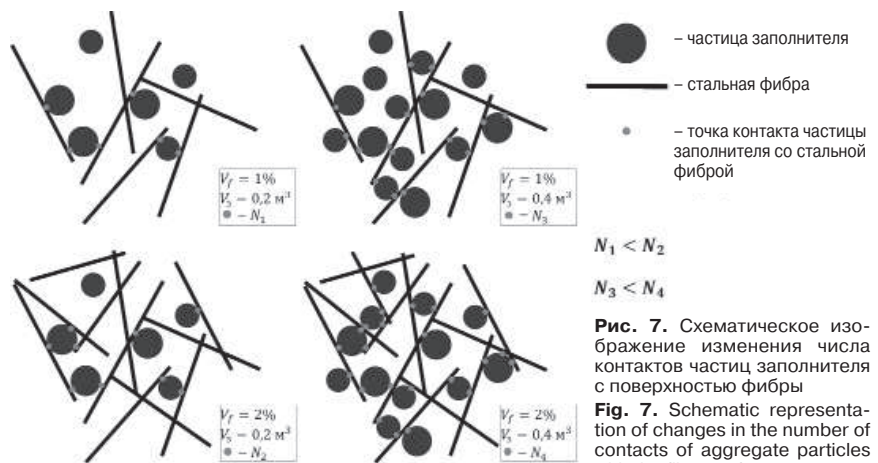


Рис. 7. Схематическое изображение изменения числа контактов частиц заполнителя с поверхностью фибры

Fig. 7. Schematic representation of changes in the number of contacts of aggregate particles with the fiber surface

тивной. Данный факт можно объяснить тем, что в составах с большим количеством фибры каждая частица заполнителя может соприкасаться сразу с несколькими волокнами. На рис. 7 приведена принципиальная схема возможного расположения стальной фибры и ее контакта с заполнителем.

Таким образом, при подборе состава СВФБ необходимо стремиться к обеспечению максимально возможного содержания заполнителя, но при этом учитывать, что верхняя граница объемного содержания заполнителя должна определяться, исходя из обеспечения требуемой подвижности свежеприготовленной смеси.

Выводы

По результатам определения прочности при сжатии 21 состава сверхвысокопрочного фибробетона (СВФБ), изготовленного с четырьмя различными типами фибры, содержание которой составляло 1, 2 и 3% по объему, и бетонной матрицей, содержащей 0,2 и 0,4 м³/м³ заполнителя, могут быть сделаны выводы:

1. Стальная фибра прямого профиля не приводит к изменению прочности при сжатии СВФБ при ее объемном содержании в диапазоне 1–3%.

2. Увеличение содержания волновой и анкерной фибры приводит к увеличению прочности на 10–30 МПа при увеличении ее содержания с 1 до 3%.

3. По полученным результатам испытаний, а также данным из различных литературных источников установлена линейная зависимость между относительной прочностью при сжатии СВФБ $R_{отн}$ и фактором фибры χ_f , который рассчитывается с учетом объема и соотношения l_f/d_f фибры. Было обнаружено, что угол наклона функции $R_{отн}=f(\chi_f)$ к оси ординат выше для составов с волновой фиброй по сравнению с анкерной.

4. Получены уравнения для расчета прочности при сжатии и объемного содержания стальной фибры в СВФБ, которые могут использоваться при проектировании составов.

5. Установлено, что прочность СВФБ растет при увеличении объемного содержания заполнителя в составе вне зависимости от типа фибры. Интенсивность роста прочности повышается в составах с большим объемным содержанием фибры.

6. Получены составы СВФБ на отечественном сырье с прочностью при сжатии в диапазоне 150–193,2 МПа.

Список литературы / References

1. Vajaber M.A., Hakeem I.Y. UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10, pp. 1058–1074. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051>
2. Azmeem N.M., Shafiq N. Ultra-high performance concrete: from fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 9. e00197 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>
3. Sharma R., Jang J.G., Bansal P.P. A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on

- engineering properties of ultra-high-performance concrete. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 45. 103314. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103314>
4. Benson S.D.P., Karihaloo B.L. CARDIFRC[®] – development and mechanical properties. Part III: Uniaxial tensile response and other mechanical properties. *Magazine of Concrete Research*. 2005. Vol. 57, pp. 433–443. <https://doi.org/10.1680/mac.2005.57.8.433>
5. Yang J., Chen B., Nuti C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 302. 124104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124104>
6. Savino V., Lanzoni L., Tarantino A.M., Viviani M. An extended model to predict the compressive, tensile and flexural strengths of HPFRCs and UHPFRCs: Definition and experimental validation. *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 163, pp. 681–689. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.113>
7. Yang J., Chen B., Wu X., Xu G. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368. 130349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130349>
8. Paschalis S., Lampropoulos A. Fiber content and curing time effect on the tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*. 2017. Vol. 18, pp. 577–588. <https://doi.org/10.1002/suco.201600075>
9. Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 48, pp. 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015>
10. Yoo D.Y., Lee J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 2013. Vol. 106, pp. 742–753. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.033>
11. Roy M., Hollmann C., Wille K. Influence of volume fraction and orientation of fibers on the pullout behavior of reinforcement bar embedded in ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 146, pp. 582–593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.081>
12. Pyo S., Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 56, pp. 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.002>
13. Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B. Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. 119844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119844>
14. Jia J., Ren Z., Bai Y., Li J., Sun Y., Zhang Z., Zhang J. Tensile behavior of UHPC wet joints for precast bridge deck panels. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 283. 115826. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115826>

15. Марченко М.С., Чилин И.А., Селютин Н.М. Опыт применения сверхвысокопрочного сталефибробетона в элементах усиления железобетонных конструкций // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021. Т. 30. № 3. С. 41–50.
15. Marchenko M.S., Chilin I.A., Selyutin N.M. Experience in using ultra-high-strength steel-fiber concrete in reinforcement elements of reinforced concrete structures. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo»*. 2021. Vol. 30. No. 3, pp. 41–50 (In Russian).
16. Mash J.A., Harries K.A., Rogers C. Repair of corroded steel bridge girder end regions using steel, concrete, UHPC and GFRP repair systems. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 207. 107975. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107975>
17. Zhang H., Ji T., Lin X. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 211, pp. 688–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274>
18. Yoo D.Y., Kim S. Comparative pullout behavior of half-hooked and commercial steel fibers embedded in UHPC under static and impact loads. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 97, pp. 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.023>
19. Qi J., Wu Z., Ma Z.J., Wang J. Pullout behavior of straight and hooked-end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 191, pp. 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.067>
20. Kang S.H., Kim J.J., Kim D.J., Chung Y.S. Effect of sand grain size and sand-to-cement ratio on the interfacial bond. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47, pp. 1421–1430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.064>
21. Соловьев В.Г., Матюшин Е.В., Ефишов Л.И. Влияние объемного содержания стальной фибры и заполнителя на свойства ультравысокофункциональных фибробетонов // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. № 1. С. 16–26.
21. Solov'ev V.G., Matyushin E.V., Efshov L.I. The influence of the volumetric content of steel fiber and filler on the properties of ultra-high-functional fiber-reinforced concrete. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2022. Vol. 29. No. 1, pp. 16–26. (In Russian).
22. Соловьев В.Г., Матюшин Е.В., Веселов В.К. Изучение влияния вида и объемного содержания заполнителя на свойства сверхвысокопрочного мелкозернистого бетона // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. № 4. С. 317–325.
22. Soloviev V.G., Matyushin E.V., Veselov V.K. Study of the influence of the type and volumetric content of aggregate on the properties of ultra-high-strength fine-grained concrete. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2022. Vol. 29. No. 4, pp. 317–325.
23. Soloviev V., Matyushin E., Mihailov V., Efshov L. Effect of mixture flowability on strength and fiber distribution of Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete. *E3S Web of Conferences*. Vol. 410. DOI:10.1051/e3sconf/202341001012
24. Тамов М.М., Салиб М.И.Ф., Абуизеих Ю.К.И., Софьяников О.Д. Подбор составов и исследование прочностных характеристик самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2022. № 4. С. 25–39.
24. Tamov M.M., Salib M.I.F., Abuizeikh Yu.K.I., Sofyanikov O.D. Selection of compositions and study of the strength characteristics of self-compacting ultra-high-strength steel fiber concrete. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2022. No. 4, pp. 25–39. (In Russian).
25. Чилин И.А. Влияние технологических факторов на свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020. Т. 27. № 4. С. 135–157.
25. Chilin I.A. The influence of technological factors on the properties of ultra-high-strength steel fiber concrete. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo»*. 2020. Vol. 27. No. 4, pp. 135–157. (In Russian).
26. Yu R., Spiesz P., Brouwers H.J.H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 565, pp. 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>
27. Song Q., Yu R., Shui Z., Rao S., Wang X., Sun M., Jiang C. Steel fibre content and interconnection induced electrochemical corrosion of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 94, pp. 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.010>
28. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Горбунов И.А. Влияние характеристик фибры на кубиковую и призмную прочность сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей // *Бетон и железобетон*. 2013. № 6. С. 6–9.
28. Dorf V.A., Krasnovsky R.O., Kapustin D.E., Gorbunov I.A. The influence of fiber characteristics on the cubic and prismatic strength of steel-fiber concrete with a cement-sand matrix. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No. 6, pp. 6–9. (In Russian).
29. Arel H.S. Effects of curing type, silica fume fineness, and fiber length on the mechanical properties and impact resistance of UHPFRC. *Results in Physics*. 2016. Vol. 6, pp. 664–674. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.09.016>
30. Lagne-Kornbak D., Karihaloo B.L. Design of fiber-reinforced DSP mixes for minimum brittleness. *Advanced Cement Based Materials*. 1998. Vol. 7, pp. 89–101. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00057-6)
31. Li V.C. A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 1992. Vol. 14, pp. 131–141. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(92\)90006-H](https://doi.org/10.1016/0958-9465(92)90006-H)
32. Abrishambaf A., Pimentel M., Nunes S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 97, pp. 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.007>

С.С. КАПРИЕЛОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (kapriellov@mail.ru),
 А.В. ШЕЙНФЕЛЬД¹, д-р техн. наук, советник РААСН;
 В.И. ТРАВУШ², д-р техн. наук, проф., академик РААСН;
 Н.И. КАРПЕНКО³, д-р техн. наук, проф., академик РААСН;
 С.Б. КРЫЛОВ¹, д-р техн. наук, член-корр. РААСН

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 АО «Городской проектный институт жилых и общественных зданий» (105064, г. Москва, Нижний Сусальный пер., 5, стр. 5А)

³ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени

По данным многочисленных производственных и лабораторных испытаний проведен анализ фактических значений основных нормируемых прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов классов В60–В100: предельного сопротивления осевому сжатию, начального модуля упругости и коэффициента Пуассона. Установлено, что значения призмочной прочности (R_b) приближаются к кубиковой (R), а соотношение между ними (коэффициент призмочной прочности) не ниже 0,85. Сравнение фактических значений R_b с расчетными для предельных состояний I группы по СП 63.13330.2018 показывает, что для бетонов классов выше В70 в нормативном документе расчетные значения R_b необоснованно занижены. Величина коэффициента вариации высокопрочных бетонов не превышает 6,5%, что предопределено особенностями их составов, обеспечивающих стабильность консистенции, сегрегационную устойчивость и технологическую надежность бетонных смесей. Значения начального модуля упругости (E_b) превышают нормативные, предусмотренные СП 63.13330.2018. Установлена зависимость значений начального модуля упругости бетонов одинакового класса от природы крупного заполнителя. По данным эксперимента, модуль упругости может, в зависимости от характеристик применяемого крупного заполнителя, изменяться в диапазоне до 19%. Такая вариабельность E_b согласуется с рекомендациями EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, но не учитывается в СП 63.13330.2018. Временной фактор влияет на изменение значений прочности (R и R_b) и модуля упругости (E_b). Согласно полученным данным, в период от 28 сут до 1,5 лет прирост прочности составил 15–17%, модуля упругости 8,8–9,8%. Установлено, что изменение указанных характеристик во времени описывается математическими моделями и соответственно поддается прогнозированию в зависимости от возраста бетонов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что нормируемые параметры СП 63.13330.2018 не полностью учитывают ресурс современных высокопрочных бетонов, это делает необходимым внесение изменений в указанный документ.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, модуль упругости, кубиковая прочность, призмочная прочность, динамика изменения характеристик, коэффициент Пуассона, диаграммы деформирования, степень гидратации цемента.

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Крылов С.Б. Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-28-38>

S.S. KAPRIELOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS(kapriellov@mail.ru),

A.V. SHEYNFELD¹, Doctor of Sciences (Engineering), Advisor of RAACS; V.I. TRAVUSH², Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Academician of RAACS;

N.I. KARPENKO³, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Academician of RAACS;

S.B. KRYLOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding Member of RAACS

¹ Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC "Research Center of Construction"

(6, bldg. 5, 2ya Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

² JSC "City Design Institute of Residential and Public Buildings (5, bldg. 5A, Nizhniy Susalnyi Lane, Moscow, 105064, Russian Federation)

³ Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivny Passage, Moscow, 127238, Russian Federation)

Assessment of Strength and Deformation Characteristics of High-Strength Concrete in Structures and the Dynamics of Their Changes over Time

Based on the data from numerous production and laboratory tests, an analysis of the actual values of the main standardized strength and deformation characteristics of high-strength concrete of classes B60–B100 was carried out: ultimate resistance to axial compression, initial modulus of elasticity and Poisson's ratio. It has been established that the values of prismatic strength (R_b) are close to cubic (R), and the ratio between them (prismatic strength coefficient) is not lower than 0.85. A comparison of R_b values with those calculated for limit states of the 1st group according to SP 63.13330.2018 shows that for concrete classes above B70 in the regulatory document they are unreasonably underestimated. The value of the coefficient of variation of high-strength concretes does not exceed 6.5%, which is predetermined by the features of their compositions, which ensure stability of consistency, segregation stability and technological reliability of concrete mixtures. The values of the initial elastic modulus (E_b) exceed the normative ones provided for by SP 63.13330.2018.

The dependence of the values of the initial modulus of elasticity of concrete of the same class on the nature of the coarse aggregate has been established. According to experimental data, the elastic modulus can vary in the range of up to 19% depending on the characteristics of the coarse aggregate used. This variability of E_b is consistent with the recommendations of EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, but is not taken into account in SP 63.13330.2018. The time factor affects the change in the values of strength (R and R_b) and elastic modulus (E_b). According to the data obtained, in the period from 28 days to 1.5 years the increase in strength was 15–17%, elastic modulus – 8.8–9.8%. It has been established that changes in these characteristics over time are described by mathematical models and, accordingly, can be predicted depending on the age of concrete. The results obtained indicate that the standardized parameters of SP 63.13330.2018 do not fully take into account the service life of modern high-strength concrete, which makes it necessary to make changes to the specified document.

Keywords: high-strength concrete, modulus of elasticity, cubic strength, prismatic strength, dynamics of changes in characteristics, Poisson's ratio, deformation diagrams, degree of cement hydration.

For citation: Kapriyev S.S., Sheynfeld A.V., Travush V.I., Karpenko N.I., Krylov S.B. Assessment of strength and deformation characteristics of high-strength concrete in structures and the dynamics of their changes over time. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 28–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-28-38>

Объективная оценка значений нормативных и расчетных характеристик высокопрочных бетонов и динамики их изменения во времени, начиная от периода возведения монолитных конструкций до момента ввода в эксплуатацию сооружения, представляется одним из важных факторов оптимизации как строительного производства, так и продолжительности жизненного цикла сооружений.

Значимость этого фактора особенно велика для уникальных, в частности высотных, сооружений, если иметь в виду, как правило, 3–4-летнюю продолжительность их строительства, в течение которой свойства бетонов будут изменяться.

Между тем действующими нормами проектирования СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» [1] изменение основных нормативных характеристик в зависимости от возраста бетонов не учитывается. Так же как не учитывается изменчивость деформационных характеристик равнопрочных бетонов в зависимости от технологических или рецептурных факторов, в частности от природы крупного заполнителя, и некоторые другие особенности современных бетонов.

Предметом рассмотрения являются изменения значений прочности при сжатии кубов (R) и призм (R_b), начального модуля упругости (E_b) и коэффициента Пуассона (ν) высокопрочных бетонов (классы В60–В100), твердеющих в нормальных температурно-влажностных ($t=18–22^\circ\text{C}$; $W=90–100\%$) условиях или в режиме выдерживания монолитных конструкций в естественных условиях, в зависимости от технологических факторов и возраста бетонов.

Изменение прочности и модуля упругости во времени, зависящее от качества и соотношения компонентов бетонных смесей и условий твердения бетонов, можно прогнозировать с учетом возраста бетонов разными способами, например рассчитать по формулам из EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 [2]:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm}; \quad (1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\{s[1-(28/t)^{1/2}]\}; \quad (2)$$

$$E_{cm}(t) = E_{cm}(28)[f_{cm}(t)/f_{cm}]^{0,3}, \quad (3)$$

где $f_{cm}(t)$ – средняя цилиндрическая прочность бетона при сжатии в возрасте t сут, МПа; f_{cm} – средняя цилиндрическая прочность бетона при сжатии в воз-

расте 28 сут, МПа; t – возраст бетона, сут; $\beta_{cc}(t)$ – коэффициент, зависящий от возраста бетона t ; s – коэффициент (0,2–0,38), зависящий от типа используемого цемента; $E_{cm}(t)$ – модуль упругости бетона в возрасте t сут, МПа; $E_{cm}(28)$ – модуль упругости бетона в возрасте 28 сут, МПа.

Значения начального модуля упругости бетона также могут быть рассчитаны по разным формулам, или расчетным моделям, выражающим зависимость этого параметра от пределов прочности при сжатии. Так, например:

– по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 [2]

$$E_{cm} = 22 k (f_{cm}/10)^{0,3}; \quad (4)$$

– по норвежскому стандарту NS 3473 [3]

$$E_{cm} = 9,5 f_{cm}^{0,3} (\rho/2400)^{1,5}; \quad (5)$$

– по Model Code 2010 [4]

$$E_{cm} = 10 k (f_{cm}+8)^{1/3}; \quad (6)$$

– по данным И.М. Безгодова с соавторами [5],

$$E_{cm} = 52000 R_b / (23+0,92 R_b), \quad (7)$$

где k – коэффициент (0,7–1,2), зависящий от вида крупного заполнителя; R_b – призматическая прочность бетона в возрасте 28 сут, МПа; ρ – средняя плотность бетона, кг/м³.

Заметим, что аналогами обозначений f_{cm} и E_{cm} являются принятые в РФ R_b и E_b . Указанные формулы (4)–(7) по определению значений модуля упругости бетона получены расчетно-эмпирическим путем, что придает им оттенок субъективности и не позволяет признать универсальными, так как все они, так же как подобные им другие, требуют учета разных коэффициентов, отражающих технологические факторы, такие как подвижность бетонных смесей, плотность бетона, качество вяжущего и заполнителей и др.

Поэтому, наряду с расчетом, остается актуальным вопрос определения фактических значений модуля упругости и оптимизации методики контроля этой характеристики в конструкциях.

Для расчета E_b следует иметь в виду и рецептурные факторы – удельный объем и модуль упругости составляющих частей бетона: цементного камня и заполнителей [5, 6] или растворной части и крупного заполнителя [7]. В общем это может быть выражено зависимостями:

$$E_b = E_{цк} V_{цк} + E_p V_p + E_{щ} V_{щ}; \quad (8)$$

$$E_b = E_p V_p + E_{щ} V_{щ}, \quad (9)$$

где $E_{цк}$, E_p , $E_{щ}$ и $V_{цк}$, V_p , $V_{щ}$ – соответственно модули упругости и удельные объемы цементного камня, песка и щебня; E_p и V_p – модуль упругости и удельный объем растворной части бетона.

Зависимость E_b от характеристик крупного заполнителя отражает номограмма, представленная Р.-С. Айтсін [8, 9], проанализировавшим информацию из разных источников [2, 3, 5]. Из нее следует, что модуль упругости как обычных, так и высокопрочных бетонов прочностью при сжатии от 20 до 120 МПа, в зависимости от качества горной породы, из которой получен крупный заполнитель, а по существу – от модуля упругости крупного заполнителя, может варьироваться в широком диапазоне – до 20%. Заметим, что такая вариабельность модуля упругости бетона в зависимости от свойств крупного заполнителя нашла отражение и в ряде нормативных и рекомендательных документов, в частности в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и Model Code 2010.

Приведенные выше расчетные модели и зависимости позволяют в общем, основываясь на прочности бетона, прогнозировать модуль упругости с той или иной достоверностью. В то же время для оценки динамики их изменения важно учитывать и рецептурно-технологические особенности высокопрочных бетонов, в частности то, что ключевым фактором их производства является использование портландцементов типа ЦЕМ I в сочетании с высокоактивными минеральными добавками и суперпластификаторами или с комплексными продуктами – органоминеральными модификаторами типа МБ [10].

Целью работы являлась оценка фактических значений и динамики изменения во времени пределов прочности при сжатии и деформационных характеристик модифицированных высокопрочных бетонов классов В60–В100 и сравнение их с нормативными и расчетными характеристиками.

Для этого решали следующие задачи:

- выполнен статистический анализ опубликованных данных о кинетике твердения высокопрочных бетонов, произведенных заводами в массовых объемах и доставленных на строящиеся объекты делового центра «Москва-Сити»;

- оценивалось влияние прочностных и деформационных характеристик крупного заполнителя из разных горных пород на прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона самоуплотняющихся бетонов классов В30–В100;

- обосновывался метод определения фактических значений начального, или статического, модуля упругости бетона (E_b) в конструкциях по значению динамического модуля упругости (E_d), полученного по испытанию образцов-кернов, отобранных из конструкций;

- оценивались предельные относительные деформации сжатия и полные диаграммы деформирования самоуплотняющихся бетонов классов В30–В100;

- исследовались изменения во времени, в течение 1,5 лет (до 550 сут), пределов прочности при сжатии и модуля упругости высокопрочных бетонов возведенных конструкций каркасов трех высотных зданий жилого комплекса Capital Towers в г. Москве;

- проведено сравнение полученных данных с нормативными характеристиками, приведенными в СП 63.13330.2018 и в зарубежных нормативно-технических документах.

Методика проведения работ и характеристики материалов

Компоненты бетонных смесей

Для производства бетонных смесей применяли материалы, которые используются для массового производства высокопрочных и малоцементных бетонов [5, 11], в частности:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н, соответствующий ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»;

- органоминеральный модификатор бетона МБ10-50С А-II-2, включающий в себя микрокремнезем (45%), золу-уноса (45%) и суперпластификатор (10%), соответствующий ГОСТ Р 56178–2014 «Модификаторы органоминеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия» и ТУ 5743-083-46854090–98 с изм. № 1–3;

- микрозаполнитель – порошок минеральный неактивированный марки МП-1 (молотый известняк) с размером частиц менее 1,25 мм, соответствующий ГОСТ Р 52129–2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия» и ГОСТ Р 56592–2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия»;

- песок кварцевый I класса с модулем крупности $M_{кр}=2,5$, соответствующий ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»;

- щебень фракции 3–10 мм из разных горных пород (гравия плотностью 2650 кг/м³ марки 1200 с модулем упругости до 60 ГПа, гранита плотностью 2670 кг/м³ марки 1400 с модулем упругости до 68 ГПа, габбро-диабазы плотностью 3070 кг/м³ марки 1400 с модулем упругости до 125 ГПа, базальта плотностью 3000 кг/м³ марки 1400 с модулем упругости до 100 ГПа), соответствующий ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия»;

- вода для затворения бетонных смесей, соответствующая ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Составы бетонных смесей

Приготовлены семь серий самоуплотняющихся бетонных смесей с расходом цемента от 290 до 480 кг/м³ с добавками модификатора от 10 до 27% массы цемента и микрозаполнителя от 50 до 150 кг/м³ при водовяжущем отношении В/(Ц+МБ) от 0,25 до 0,69,

составы которых оптимизированы для каждого класса бетона. Каждая серия приготавливалась с четырьмя видами крупного заполнителя (щебнем из гравия, гранитным, габбро-диабазовым и базальтовым щебнем) с расчетом на одинаковую объемную дозировку крупного заполнителя, которая находилась в узком диапазоне – от 0,31 до 0,335 м³/м³. Составы бетонных смесей и свойства бетонов представлены в таблице, которая воспроизведена ниже по данным из предыдущих публикаций [5, 11].

Испытания бетонов

Пределы прочности при сжатии кубов (R) и призм (R_b) определяли на образцах размером 100×100×100 и 100×100×400 мм соответственно.

Модуль упругости (E_b) и коэффициент Пуассона (ν) определяли на образцах 100×100×400 мм.

Испытания проводили согласно ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» и ГОСТ 31914–2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества».

Прочность бетонов в конструкциях определяли комплексом неразрушающих методов и испытанием кернов согласно ГОСТ 28570–2019 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций», ГОСТ 22690–2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля», ГОСТ 18105–2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Модуль упругости (E_b) бетонов непосредственно в конструкциях определяли путем измерения величины динамического модуля упругости (E_d) на образцах-кервах диаметром 74, длиной 296 мм и сопоставления по градуировочной зависимости с результатами измерений E_b на образцах-призмах 100×100×400 мм из аналогичных бетонов. Величина E_d определялась согласно инструкциям [12, 13].

Зависимость (E_b-E_d) по ранее опубликованным данным [11] воспроизведена на рис. 1 и выражается формулой:

$$E_b = 0,982 E_d - 3,437. \quad (10)$$

Кинетика изменения свойств бетонов

Статистическая обработка опубликованных ранее [14] данных о кинетике изменения в течение 12 мес прочности бетонов класса В90 проводилась по данным испытаний контрольных образцов-кубов размером 100×100×100 мм, приготовленных на стройплощадке при приемочном контроле качества 313 партий готовых бетонных смесей, доставленных на строительство комплекса «Федерация» на территории ММДЦ «Москва-Сити». Все образцы приготовлены из высокоподвижных (ОК=22–26 см) и самоуплотняющихся (РК=60–70 см) бетонных смесей и выдерживались в нормальных температурно-влажностных условиях.

Кинетика изменения в течение 18 мес фактических значений прочности и модуля упругости бетонов классов В60 и В80 непосредственно в вертикальных конструкциях высотных зданий жилого комплекса Capital Towers в Москве определялась в процессе их строительства по результатам комплексных испытаний неразрушающими и разрушающим методами. Конструкции были сгруппированы по проектному классу бетона и периоду их возведения, что позволило построить соответствующие градуировочные зависимости и определить значения коэффициентов вариации и фактические значения характеристик бетонов в разном возрасте с учетом их однородности.

Степень гидратации цемента

Степень гидратации цемента определяли рентгенофазовым анализом путем сопоставления количества C_3S в исходном вяжущем до затворения водой и в затвердевшем цементном камне. Количество

Составы и свойства самоуплотняющихся бетонных смесей
Compositions and properties of self-compacting concrete mixtures

Составы бетонных смесей, кг/м ³							Свойства бетонных смесей			
Ц	МБ	МП-1	П	Щ	СП	В	γ , кг/м ³	$V_{щ}$, м ³ /м ³	РК, см	В/(Ц+МБ)
290	–	150	820	855 ¹ / 870 ² / 995 ³ / 970 ⁴	3,52	198	2316–2456	0,32	55–58	0,69
300	30	170	835	830 ¹ / 835 ² / 960 ³ / 940 ⁴	–	176	2341–2471	0,31	55–59	0,53
300	50	180	845	835 ¹ / 850 ² / 970 ³ / 950 ⁴	–	158	2368–2503	0,32	60–63	0,45
350	65	150	815	820 ¹ / 840 ² / 955 ³ / 930 ⁴	–	160	2360–2495	0,31	60–70	0,39
420	70	100	825	830 ¹ / 845 ² / 955 ³ / 930 ⁴	–	161	2406–2531	0,31	60–68	0,33
450	100	50	790	870 ¹ / 875 ² / 1005 ³ / 1000 ⁴	–	154	2414–2549	0,33	62–70	0,28
480	130	50	725	880 ¹ / 905 ² / 1015 ³ / 985 ⁴	–	152	2417–2552	0,33	62–70	0,25

Примечания:

Ц – портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н; МБ – органоминеральный модификатор бетона; МП-1 – микрозаполнитель; П – песок кварцевый, Мкр = 2,5; Щ – щебень фракции 5–10 мм: ¹ из гравия плотностью 2650 кг/м³; ² гранитный плотностью 2670 кг/м³; ³ габбро-диабазовый плотностью 3070 кг/м³; ⁴ базальтовый плотностью 3000 кг/м³; СП – суперпластификатор; В – вода; γ – средняя плотность смеси; $V_{щ}$ – объем крупного заполнителя в объеме бетонной смеси; РК – подвижность по распылу нормального конуса.

С₃S определяли по интенсивности основного рефлекса алита ($\alpha=1,76$). Образцы приготовлены из вяжущего, включающего цемент марки ЦЕМ I 52,5 Н и добавки разных модификаторов типа МБ в одинаковом количестве – 20% от массы цемента при водвяжущем отношении (В/В) от 0,14 до 0,3.

Результаты

Фактические значения кубиковой и призмной прочности бетонов классов В30–В100 в возрасте 28 сут, по данным [5], в сравнении с нормативными и расчетными значениями сопротивления бетонов осевому сжатию (R_b и $R_{b,ser}$) по СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 приведены на рис. 2.

Экспериментально полученные фактические значения призмной прочности бетонов классов В30–В100 значительно превосходят нормативные и расчетные значения сопротивления бетонов осевому сжатию, приведенные в СП 63.13330.2018 на 47–64% и 113–119%, а в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 – на 22–45% и 113–184% соответственно.

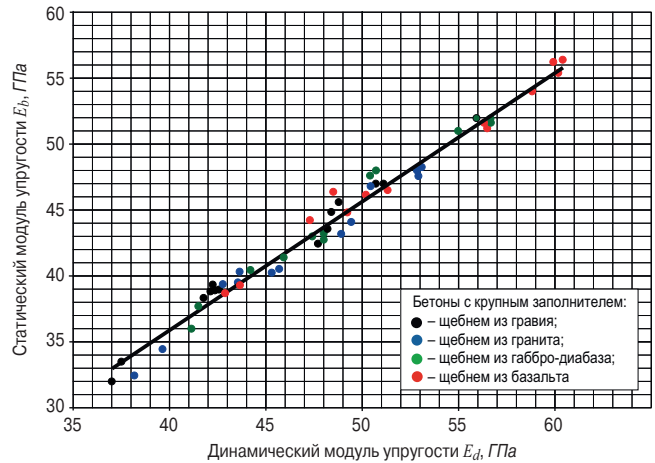


Рис. 1. Зависимость между значениями статического (начального) и динамического модулей упругости для бетонов классов В30–В100 с заполнителями из разных горных пород [11]

Fig. 1. Relationship between the values of static (initial) and dynamic modulus of elasticity for concrete classes B30–B100 with coarse aggregates from different rocks [11]

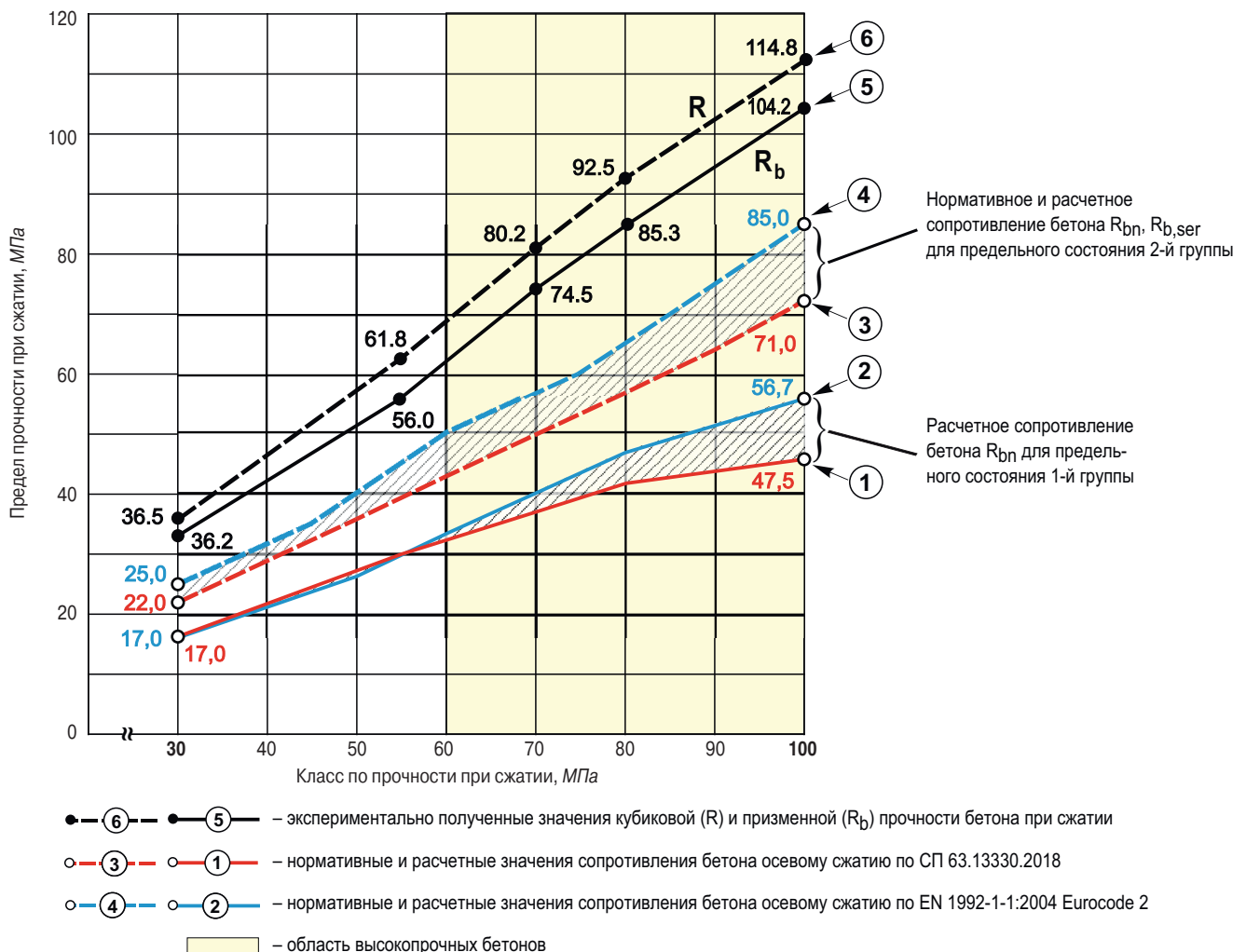


Рис. 2. Кубиковая (R) и призмная (R_b) прочность бетонов классов В30–В100 в сравнении с нормативными и расчетными значениями сопротивления бетонов осевому сжатию по СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 для расчета по предельным состояниям 1-й и 2-й групп

Fig. 2. Cubic (R) and prismatic (R_b) compressive strength of concrete classes B30–B100 in comparison with standard ones and calculated values of concrete resistance to axial compression according to SP 63.13330.2018 and EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 for calculations based on limit states of groups 1 and 2

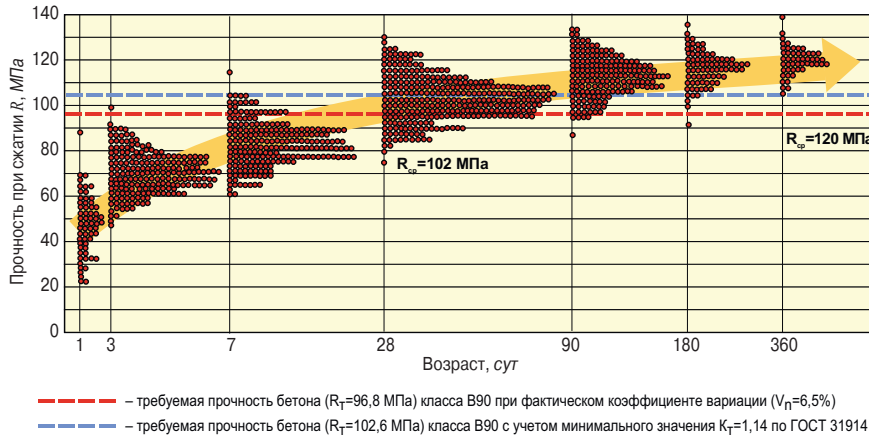


Рис. 3. Фактические значения прочности при сжатии бетона класса В90 в течение года по результатам контроля 313 партий бетонных смесей, доставленных на стройплощадку [14]
Fig. 3. Actual values of compressive strength of concrete class В90 during the year, based on the results of control of 313 batches of concrete mixtures delivered to the construction site [14]

На рис. 3 приведены, по данным [14], кубиковая прочность при сжатии и кинетика твердения высокопрочных бетонов класса В90 в течение 360 сут, которая получена при статистической обработке результатов контроля 313 промышленных партий высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей, доставленных на стройплощадку. Прирост прочности в период от 28 сут ($R_{ср}=102$ МПа) до одного года ($R_{ср}=120$ МПа) составляет 17%, что характерно для бетонов конкретного вещественного состава: приготовленных с использованием портландцемента типа ЦЕМ I и органоминеральных модификаторов типа МБ. Следует отметить однородность результатов испытаний образцов, приготовленных из многочисленных партий бетонных смесей, произведенных разными заводами при разных погодных условиях, которая выражается в сравнительно низком коэффициенте вариации, равном 6,5%.

Тенденция прироста прочности, а также значений модуля упругости наблюдается в течение более продолжительного времени – до 1,5 лет, что подтверждается данными испытаний бетонов классов В60 и В80

в вертикальных конструкциях высотных зданий жилого комплекса Capital Towers (Москва).

Кинетика изменения фактических значений прочности при сжатии и начального модуля упругости бетонов в конструкциях в сравнении с рассчитанными по формулам (1) и (3) EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 приведена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, в период от 28 до 550 сут в зависимости от класса прирост прочности бетонов составил 15–17% и соответствует рассчитанному согласно EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 уровню 17%. Прирост модуля упругости бетонов классов В60 и В80 за тот же период составил 5,8% и в целом соответствует рассчитанному согласно EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 уровню 4,4–4,8%.

Так как кинетика твердения бетона, соответственно прирост прочности и модуля упругости связаны с кинетикой гидратации цемента, следует обратить внимание на результаты определения изменения степени гидратации цемента в высокопрочных бетонах с модификаторами типа МБ. По данным [15–17], приведенным на рис. 5, к 28 сут нормального твердения степень гидратации цемента с 20% органоминерального модификатора в зависимости от водовязущего отношения изменяется от 30% (при $V/(Ц+МБ)=0,14$) до 80% (при $V/(Ц+МБ)=0,3$). Это свидетельствует о наличии в цементном камне значительного количества – не менее 20% не полностью гидратированного цемента, так называемого остаточного «клинкерного фонда» – главного фактора повышения характеристик бетона во времени.

Результаты определения и зависимость начального модуля упругости от классов бетонов В30–В100 (прочностью при сжатии 36,2–115,1 МПа) с различными видами крупного заполнителя, по данным [11],

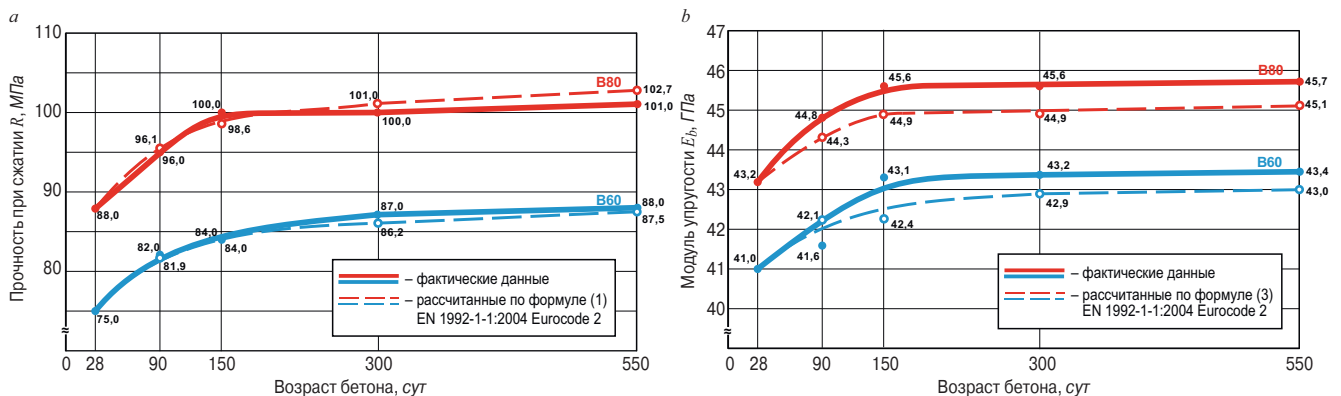


Рис. 4. Фактические и расчетные значения прочности при сжатии (а) и начального модуля упругости (b) бетонов проектных классов В60 и В80 в вертикальных конструкциях высотных зданий жилого комплекса Capital Towers в период от 28 до 550 сут после бетонирования
Fig. 4. Actual and calculated values of compressive strength (a) and initial modulus of elasticity (b) of concrete of design classes В60 and В80 in vertical structures of high-rise residential buildings Capital Towers complex in the period from 28 to 550 days after concreting

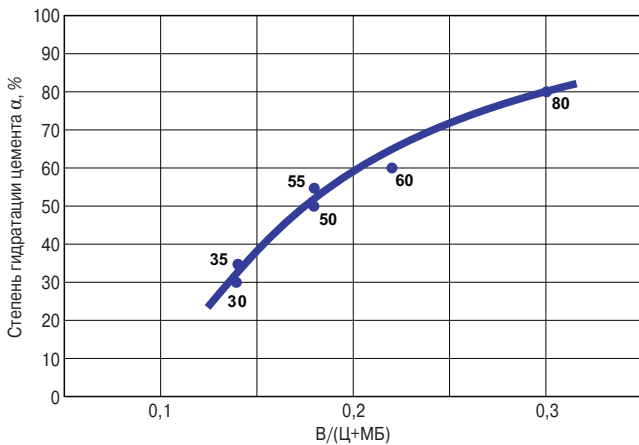


Рис. 5. Зависимость степени гидратации портландцемента в возрасте 28 сут от водовязящего отношения – $W/(C+MB)$
Fig. 5. Dependence of the degree of hydration of portland cement at the age of 28 days from the water-binding ratio – $W/(C+MB)$

и их сравнение со значениями по СП 63.13330.2018 представлены на рис. 6.

Полученные результаты (рис. 6) показывают, что модуль упругости бетонов классов В30–В70 на обычных крупных заполнителях (гранитном щебне и щебне из гравия) соответствует значениям, приведенным в СП 63.13330.2018. Модуль упругости высокопрочных бетонов классов В70–В100 на тех же обычных крупных заполнителях (гранитном щебне и щебне из гравия) превышает на 5–14% значения, приведенные в СП 63.13330.2018, и соответствует Model Code MC 2010. Использование в качестве крупного заполнителя габбро-диабазового и базальтового щебня позволяет повысить статический модуль упругости тяжелых бетонов классов по прочности при сжатии В30–В100 на 9 и 19% соответственно, что согласуется с информацией, приведенной FIB в Model Code 2010 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

По данным [5, 11], коэффициент Пуассона бетонов классов В30–В100 имеет тенденцию к повышению по мере увеличения прочности бетона при сжатии, находится в диапазоне от 0,2 до 0,25 и в целом соответствует значению 0,2, нормированному в СП 63.13330.2018, EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и Model Code MC 2010.

Полные диаграммы деформирования бетонов классов В30–В100 с призменной прочностью (R_b) от 36,2 до 104,2 МПа, приведенные по данным [5] на рис. 7, показывают, что для высокопрочных бетонов предельные относительные деформации находятся в диапазоне от 294×10^{-5} до 326×10^{-5} , что выше значения (200×10^{-5}), предусмотренного СП 63.13330.2018.

Нисходящая ветвь при уровне нагружения $0,85R_b$ наблюдается только у бетона класса В30, где предельные относительные деформации оказались на близком уровне к СП 63.13330.2018, т. е. 261×10^{-5} . У бетонов более высоких классов при том же уровне нагружения нисходящая ветвь отсутствует. В це-

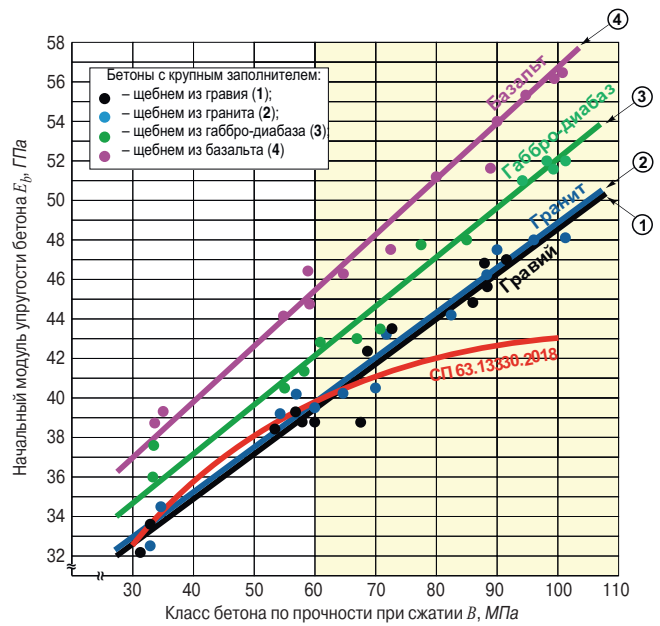


Рис. 6. Зависимость модуля упругости от класса бетона и вида крупного заполнителя [11]
Fig. 6. Dependence of the elastic modulus on the class of concrete and type of coarse aggregate [11]

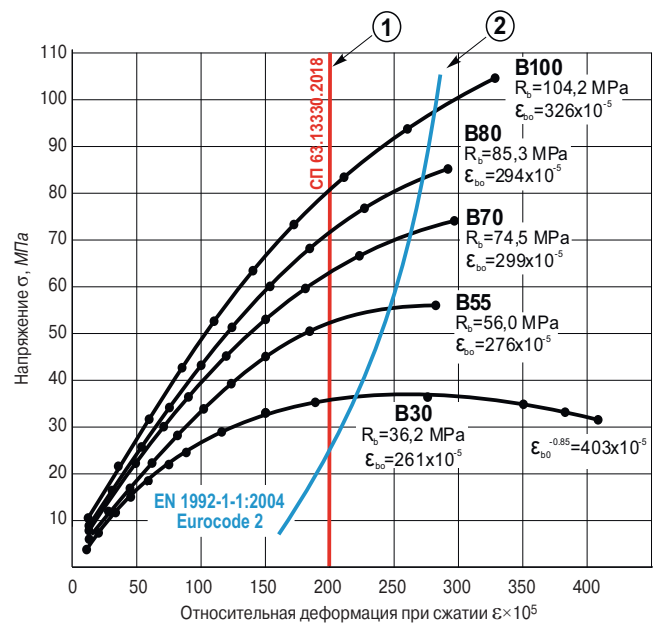


Рис. 7. Полные диаграммы деформирования бетонов классов В30–В100 при сжатии [5]
Fig. 7. Complete diagrams of the deformation of concrete classes В30–В100 under compression [5]

лом фактические значения предельных деформаций в большей мере соответствуют значениям по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

Анализ результатов

О кубиковой прочности и кинетике ее изменения во времени

Указанные на рис. 3 фактические значения кубиковой прочности (R) бетона класса В90, определенные при контроле качества более трехсот промышленных партий бетонных смесей в течение

одного года, показывают однородность и стабильность свойств высокопрочных бетонов, которая выражается в низком коэффициенте вариации, равном 6,5%.

Характерный для высокопрочных бетонов низкий коэффициент вариации, отмеченный ранее Р.-С. Aitcin [8], ACI 363 R [18] и авторами [14], связан с особенностями составов смесей, в которых, как правило, повышен расход вяжущего и понижено водо-вяжущее отношение, что делает их значительно более устойчивыми к расслоению и соответственно технологически стабильными.

Эти обстоятельства учитываются при производстве высокопрочных бетонов и отражены в ГОСТ 31914–2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества», согласно которому при контроле качества высокопрочных бетонов по контрольным образцам-кубам требуемая прочность в проектном возрасте назначается с учетом минимального значения $K_T=1,14$. Такой «запас» является своеобразной гарантией обеспечения требуемых характеристик бетонов непосредственно в конструкциях.

Тем не менее тенденция увеличения прочности и соответственно класса бетона в период от 28 до 370 сут на величину 15–17% представляется вполне достоверной, так как обоснована не только статистическими данными, но и присутствием в модифицированном цементном камне остаточного «клинкерного фонда», который является своеобразным резервным источником, обеспечивающим прирост прочности бетонов. Значительное в сравнении с обычным цементным камнем количество неиспользованного клинкерного фонда, составляющее в возрасте 28 сут около 15–20% массы цемента, связано с невысокой степенью гидратации цемента в высокопрочных бетонах в этом возрасте из-за низкого водо-содержания бетонных смесей.

Приведенные на рис. 4, а данные об изменении фактической прочности бетонов при сжатии проектных классов В60 и В80 непосредственно в конструкциях в течение более длительного периода подтверждают указанную выше тенденцию, которая вписывается в математическую модель:

$$R_t = R_0 [1,164 \cdot t / (4,73 + t)], \quad (11)$$

где R_t – кубиковая прочность бетона при сжатии в возрасте t сут, МПа; R_0 – кубиковая прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут, МПа; t – возраст бетона, сут.

Сравнение фактических данных, описанных моделью (11), с расчетными значениями, полученными по указанной выше формуле (1) из EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, показывает сходимость результатов, что подтверждает достоверность выявленной кинетики твердения высокопрочных бетонов и показывает возможность прогнозирования прироста прочности во времени расчетным методом.

В этом контексте стоит отметить более явную тенденцию прироста призмной прочности модифицированного высокопрочного бетона класса В95, приготовленного в лабораторных условиях. По данным [19], в период от 30 сут до 1,5 лет призмная прочность на осевое сжатие (R_b) возрастает на 23%.

О призмной прочности

Из рис. 2 следует, что у бетонов классов В30–В100 фактические значения призмной прочности превышают на 64–47% нормативные и расчетные сопротивления бетонов осевому сжатию $R_{b,n}$ и $R_{b,ser}$, предусмотренные действующим СП 63.13330.2018 для расчета конструкций по 2-й группе предельных состояний (по деформациям и раскрытию трещин).

При этом значения призмной прочности (R_b) приближаются к кубиковой прочности (R) бетона. Коэффициент призмной прочности (R_b/R), который не является нормативной характеристикой, но принимается во внимание при необходимости косвенно определить ориентировочное значение R_b по прочности образцов-кубов, находится в диапазоне от 0,86 до 0,99 [5, 10] и превосходит значения этого коэффициента, рассчитанного по параметрам, приведенным в СП 63.13330.2018 (от 0,71 до 0,73).

Сравнение фактических значений призмной прочности с предусмотренным в СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 сопротивлением бетонов осевому сжатию R_b для расчета конструкций по I группе предельных состояний (по несущей способности), приведенное на рис. 2, показывает, что нормируемые расчетные значения R_b ниже фактических, это логично и связано с использованием принятых в нормативах понижающих коэффициентов надежности (1,3 – в СП 63.13330.2018 и 1,5 – в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2). Однако если для бетонов классов до В60 нормируемые расчетные характеристики, предусмотренные двумя вышеуказанными нормативными документами, практически одинаковы, то для высокопрочных бетонов классов от В60 до В100 расчетные параметры по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 выше. Разница увеличивается по мере повышения класса бетонов, достигая 25 % (кривые 1 и 2 на рис. 2). Это расхождение объясняется тем, что, согласно СП, при определении расчетных значений R_b для предельных состояний I группы для бетонов классов В70–В100 в отличие от обычных бетонов более низких классов следует применять понижающий коэффициент $\gamma_{b,br}=(360-B)/300$, учитывающий хрупкость высокопрочных бетонов. Между тем характер кривых на диаграммах напряженного состояния, приведенных на рис. 7, и предельные относительные деформации у высокопрочных бетонов находятся в диапазоне от 294×10^{-5} до 326×10^{-5} , что выше нормируемого сводом правил значения 200×10^{-5} .

Это является косвенным свидетельством недооценки реального ресурса высокопрочных бетонов

из-за необоснованного занижения нормируемых расчетных значений R_b в СП 63.13330.2018.

О начальном модуле упругости и кинетике его изменения во времени

Как видно из рис. 6, фактические значения начального модуля упругости высокопрочных бетонов на стандартных заполнителях (щебне из гравия и гранитном щебне) классов В70–В100, определенные путем испытаний образцов-призм в возрасте 28 и 90 сут, выше нормируемых значений, предусмотренных СП 63.13330.2018. Разница между фактическими и нормативными значениями E_b , так же как в случае с призмной прочностью (R_b), возрастает с повышением класса бетона и составляет от 5 до 14%.

Результаты, приведенные на рис. 6, показывают, что модуль упругости бетонов классов В30–В100 в значительной степени зависит от вида крупного заполнителя, возрастая по мере повышения прочности, плотности и модуля упругости горной породы, и при использовании крупного заполнителя из габбро-диабазового и базальтового щебня нормативные значения E_b могут приниматься с повышающими коэффициентами 1,09 и 1,19 соответственно, что согласуется с информацией, приведенной FIB в Model Code 2010 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

Фактические значения начального модуля упругости бетонов классов В60 и В80, определенные путем испытаний образцов-кернов, выбуренных из возведенных конструкций, в «стандартном» 28-суточном возрасте, также на 2,9–3,8% выше нормируемых значений, предусмотренных СП 63.13330.2018. Более значимо это проявляется в позднем 550-суточном возрасте. Разница между фактическими и нормативными значениями E_b с повышением возраста бетона от 28 до 550 сут возрастает до 8,8–9,8% (рис. 4, б).

То же отмечалось в разных публикациях, в частности А. Абдельразак [20], анализируя свойства высокопрочного бетона класса С80 (аналог В100 по стандартам РФ) в вертикальных конструкциях высотного здания Бурдж-Халифа, отмечает превышение фактических значений начального модуля упругости над расчетными на величину около 7% и повышение E_b в период от 56 до 90 сут после бетонирования на 11%, а Н.И. Карпенко с соавторами [19] отмечает повышение модуля упругости (E_b) бетона класса В95 в период с 30 сут до 1,5 лет на 9,7%.

Тенденция изменения во времени полученных авторами фактических значений модуля упругости бетонов классов В60 и В80, приведенная на рис. 4, б, вписывается в математическую модель:

$$E_t = E_0 [1,06 \cdot t / (1,74 + t)], \quad (12)$$

где E_t – модуль упругости бетона в возрасте t сут, МПа; E_0 – модуль упругости бетона в возрасте 28 сут, МПа; t – возраст бетона, сут.

Сравнение характера кривых, описываемых формулой (12) и полученных расчетным путем по форму-

ле (3) EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, показывает идентичность тенденций изменения модуля упругости во времени. Положительная динамика изменения E_b во времени связана с отмеченным выше приростом прочности бетонов при сжатии и может с той или иной достоверностью рассчитываться по разным математическим моделям, в частности по предложенной нами или приведенной в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 унифицированной формуле.

О динамическом модуле упругости

Учитывая неизбежные отклонения модуля упругости бетона от расчетных значений, актуализируется проблема определения фактических значений начального модуля упругости в конструкциях. Одним из доступных методов является оценка значений E_b через динамический модуль упругости.

Динамический модуль упругости E_d бетонов классов от В30 до В100 выше начального модуля на 2,5–5,3 ГПа. При этом значения начального (статического) и динамического модулей упругости коррелируются независимо от качества крупного заполнителя в составе бетона, что отражает прямая зависимость (10), представленная на рис. 1.

Выявленная закономерность позволяет рассчитывать по соответствующей градуировочной зависимости фактические значения E_b по значениям E_d , определенным при испытаниях образцов-кернов, выбуренных из конструкций, и может быть основанием для разработки стандартизированной методики определения начального модуля упругости в конструкциях.

О коэффициенте Пуассона

Коэффициент Пуассона бетонов классов В30–В100 имеет тенденцию к повышению от 0,2 до 0,25 с увеличением прочности бетона при сжатии и в целом соответствует нормируемому значению 0,2 по СП 63.13330.2018, EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и Model Code MC 2010.

О предельных относительных деформациях сжатия

Полные диаграммы деформирования бетонов классов В30–В100 при сжатии, приведенные на рис. 7, показывают, что нисходящая ветвь наблюдается только у бетона класса В30, а для бетонов с более высокой прочностью нисходящая ветвь отсутствует. Предельные относительные деформации сжатия высокопрочных бетонов классов В70–В100 превышают их нормированное значение в СП 63.13330.2018 на 50–63% и больше соответствуют нормируемым переменным значениям для бетонов разных классов по прочности по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

Выводы

На основании анализа имеющихся многочисленных данных о значениях пределов прочности при сжатии и начального модуля упругости высокопрочных бетонов классов В60–В100 в конструкциях, воз-

веденных на объектах строительства комплекса «Москва-Сити», а также результатов испытаний установлено следующее.

1. Фактические значения призменной прочности (R_b) приближаются к кубиковой (R), по которой с учетом коэффициентов вариации рассчитываются классы бетона. Отношение R_b/R (коэффициент призменной прочности) не ниже 0,85. Величина коэффициентов вариации высокопрочных бетонов не превышает 6,5%.

2. Значения призменной прочности – предела прочности на осевое сжатие (R_b) – для бетонов классов от В60 до В100 превышают нормативные и расчетные (R_b и $R_{b,ser}$), предусмотренные в СП 63.13330.2018 для предельных состояний I и II групп, а также принятые в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, что связано с учетом в указанных нормативах понижающих коэффициентов, включая соответствующие коэффициенты надежности.

3. Сравнение расчетных значений R_b для I группы предельных состояний по СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 показывает, что у обычных бетонов классов до В60 они практически совпадают, однако у высокопрочных бетонов этот расчетный параметр по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 выше. Разница увеличивается по мере повышения класса бетона от В60 до В100, достигая 25%. Такое расхождение связано с приведенным в СП 63.13330.2018 понижающим коэффициентом $\gamma_{b,br}=(360-B)/300$, который недостаточно обоснованно, без учета реальной диаграммы напряженного состояния и предельных относительных деформаций высокопрочных бетонов, введен в расчете на хрупкость бетонов классов В70 и выше.

4. Фактические значения начального модуля упругости E_b для бетонов классов от В60 до В100 превышают нормативные, предусмотренные СП 63.13330.2018.

На модуль упругости высокопрочных, так же как обычных, бетонов существенно влияет качество крупного заполнителя: при использовании щебня из габбро-диабазы или базальта вместо менее плотной гранитной породы значения модуля упругости при равном классе бетона оказываются выше на 9 и 19 % соответственно.

Это согласуется с рекомендациями EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и СЕВ/FIP Model Code 2010, в которых отмечается переменность значений E_b в бетонах одного класса, в зависимости от вида крупного заполнителя, в пределах до 20%, однако не учитывается действующим СП 63.13330.2018.

Коэффициент Пуассона бетонов классов В60–В100 находится в диапазоне 0,20–0,25, что соответствует значениям, приведенным в нормативных документах.

5. Вариативность значений начального модуля упругости в зависимости от технологических факторов, в частности и от качества крупного заполнителя, делает актуальной проблему оценки фактического

значения этого параметра непосредственно в конструкциях.

Выявленная взаимосвязь между начальным модулем упругости (E_b) и динамическим (E_d), который определяется путем испытаний образцов-кернов, выбуренных из конструкций, является основанием для разработки стандартизированной методики определения начального модуля упругости в конструкциях.

6. Временной фактор оказывает существенное влияние на изменение прочности при сжатии (R , R_b) и начального модуля упругости (E_b) высокопрочного бетона: согласно полученным данным, прирост прочности бетонов класса В80–В90 в период от 28 до 570 сут составляет 15–17%, прирост значений модуля упругости за тот же период – 9,8%.

В основе этой тенденции – присутствие в высокопрочном бетоне в 28-суточном возрасте не полностью гидратированного цемента, так называемого остаточного «глинкерного фонда» – главного фактора, влияющего на повышение характеристик бетона во времени.

Тенденция прироста со временем прочности и начального модуля упругости поддается математическому моделированию с той или иной достоверностью, с учетом в качестве исходных данных фактических значений R , R_b и E_b в конкретный момент времени и информации о вещественном составе бетонов.

7. Положительная динамика изменения прочности и модуля упругости бетонов, так же как переменность значений модуля упругости в зависимости от качества крупного заполнителя, согласуется с нормативами и рекомендациями EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и СЕВ/FIP Model Code 2010, однако не учитывается сводом правил СП 63.13330.2018.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что нормируемые параметры СП 63.13330.2018 не полностью учитывают ресурс высокопрочных бетонов, это делает необходимым внесение изменений в указанный документ.

Список литературы / References

- СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». М.: Минстрой, 2018.
- SP 63.13330.2018 “Betonnnye I zhelezobetonnnye konstruksii. Osnovnye polozheniya” [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. Moscow. 2018.
- EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- NS 3473 Design of Concrete Structures, Norwegian Counsel for Standardization, Oslo, Norway.
- Model Code 2010. First complete draft, VI. FIB.

5. Bezgodov I., Kaprielov S., Sheynfeld A. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18 (2), pp. 175–183.
6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кузнецов Е.Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С // *Бетон и железобетон*. 2003. № 6. С. 8–12.
6. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kuznetsov E.N. On the regulation of the modulus of elasticity and creep of high-strength concrete with a modifier MB-50C. *Beton i zhelezobeton*. 2003. No. 6, pp. 8–12. (In Russian).
7. Colleparidi M. The New Concrete Published by G. Tintoretto. V. Verdi 45/47. Castrette di Vil-lorba – Italy. 2006. 421 p.
8. Aitcin P.-C. High Performance Concrete. E and FN. Spon, London. 1998. 591 p.
9. Baalbaki W., Benmokrane B., Chaallal O., Aitcin P.-C. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*. 1991. 88 (5). September-October, pp. 499–503.
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 4–10.
10. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for the production of high-strength concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 4–10. (In Russian).
11. Kaprielov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy-weight 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>
12. Resonant Frequency Testing. Technical Reference Manual / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, WD6 1RX, August 2005. 24 p.
13. Operating instructions. ERUDITE MKIV (PC 1004) / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, England. WD6 1RX, 2004. 34 p.
14. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселёва Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
14. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 9–13. (In Russian).
15. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Влияние состава органоминеральных модификаторов бетона серии «МБ» на их эффективность // *Бетон и железобетон*. 2001. № 5. С. 11–15.
15. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V. Influence of the composition of organomineral concrete modifiers of the MB series on their effectiveness. *Beton i zhelezobeton*. 2001. No. 5, pp. 11–15. (In Russian).
16. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Силина Е.С. Модифицированные бетоны в практике современного строительства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2002. № 9. С. 23–25.
16. Batrakov V.G., Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Silina E.S. Modified concrete in the practice of modern construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2002. No. 9, pp. 23–25. (In Russian).
17. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Структура и свойства высокопрочных бетонов, содержащих комплексный органоминеральный модификатор «Эмбэлит». II *Всероссийская Международная конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – пути развития»*. 5–9 сентября 2005. М., 2005. Т. 3. С. 657–671.
17. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G. Structure and properties of high-strength concrete containing complex organomineral modifier “Embelit”. II *All-Russian International Conference on Concrete and Reinforced Concrete «Concrete and Reinforced Concrete – Paths of Development»*. September 5–9, 2005. Moscow. 2005. Vol. 3, pp. 657–671. (In Russian).
18. ACI 363 R-10: Report on High-Strength Concrete. Reported by ACI Committee 363.
19. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Кузнецов Е.Н., Шейнфельд А.В., Безгодов И.М. Меры ползучести высокопрочных мелкозернистых бетонов на основе МБ // *Вестник отделения строительных наук*. М.: РААСН. 2004. Вып. 8. С. 203–214.
19. Karpenko N.I., Kaprielov S.S., Kuznetsov E.N., Sheinfeld A.V., Bezgodov I.M. Measures of creep of high-strength fine-grained concrete based on MB. *Vestnik otdeleniya stroitelnykh nauk*. 2004. Iss. 8, pp. 203–214. (In Russian).
20. Абдельразак Ахмад. Планирование бетонных работ. Ранняя стадия строительства «Бурдж-Халифа» // *Высотные здания*. 2015. № 4. С. 94–99.
20. Abdelrazaq Ahmad. Planning of concrete works. Early stage of construction of the Burj Khalifa. *Vysotnye zdaniya*. 2015. No. 4, pp. 94–99. (In Russian).

ЧОНГ ЧЫК НГУЕН¹, канд. техн. наук, преподаватель-исследователь (trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn);
 ВАН ЛАМ ТАНГ², канд. техн. наук, преподаватель-исследователь (tangvanlam@hmg.edu.vn);
 Б.И. БУЛГАКОВ³, канд. техн. наук, доцент (BulgakovBI@mgsu.ru)

¹ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона (236 Хоанг Куок Вьет, Ханой, Вьетнам)

² Ханойский горно-геологический университет (18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиём, Ханой, Вьетнам)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Определение адиабатической температуры в твердеющем бетоне по разным стандартам

Проблема термического растрескивания в массивных бетонных конструкциях до сих пор остается нерешенной. Существует много факторов, влияющих на тепловой режим в указанных бетонных конструкциях, основными из которых являются тип и содержание цемента в бетонной смеси, толщина бетонного слоя и температура окружающей среды. Однако наиболее важным фактором является причина выделения тепла. В настоящее время существует большое количество стандартов и эмпирических формул для определения происхождения источника тепла с помощью адиабатических уравнений. В данной работе приведено сравнение формул для определения адиабатической температуры в твердеющем бетоне как основы для определения теплового режима в крупногабаритных бетонных конструкциях.

Ключевые слова: бетонный массив, температурный режим твердения бетона, термонапряженное состояние, термическое трещинообразование.

Для цитирования: Нгуен Ч.Ч., Танг В.Л., Булгаков Б.И. Определение адиабатической температуры в твердеющем бетоне по разным стандартам // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-39-45>

T.C. NGUYEN¹, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer-Researcher (trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn);

V.L. TANG², Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer-Researcher (tangvanlam@hmg.edu.vn);

B.I. BULGAKOV³, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor (BulgakovBI@mgsu.ru)

¹ Le Quy Don Technical University (236 Hoang Quoc Viet Street, Ha Noi, Vietnam)

² Hanoi University of Mining and Geology (18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam)

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Determination of Adiabatic Temperature in Hardening Concrete According to Different Standards

The problem of thermal cracking in mass concrete structures still remains unsolved. There are many factors that influence the thermal regime in these concrete structures, the main ones being the type and content of cement in the concrete mixture, the thickness of the concrete layer, and the ambient temperature. However, the most important factor is the cause of the heat generated. Currently, there are a large number of standards and empirical formulas for determining the origin of a heat source using adiabatic equations. This paper provides a comparison of formulas for determining the adiabatic temperature in hardening concrete as the basis for determining the thermal regime in large-sized concrete structures.

Keywords: mass concrete, temperature regime of concrete hardening, thermally stressed state, thermal cracking.

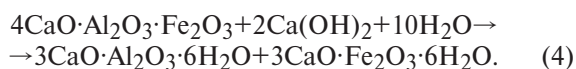
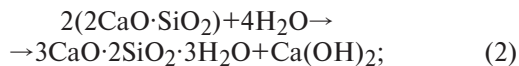
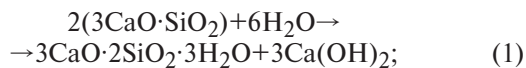
For citation: Nguyen T.C., Tang V.L., Bulgakov B.I. Determination of adiabatic temperature in hardening concrete according to different standards. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 39–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-39-45>

Выделение тепла в твердеющей бетонной смеси происходит в результате гидратации цемента или другого минерального вяжущего. В начальный период подвижная бетонная смесь находится в пластическом состоянии, имеет однородную температуру и практически не имеет прочности. В дальнейшем температура в твердеющем бетоне повышается, причем наружная поверхность бетонного массива, контактирующая с окружающей средой, остывает быстрее, чем его средняя часть, и в результате этого в твердеющем бетоне возникает перепад температуры. Средняя часть бетонного блока имеет более высокую температуру, чем его внешний слой, и поэтому локально расширяется. При этом внешний слой бетона, менее подверженный расширению, образует оболочку, которая сдерживает расширение внутреннего бетонного ядра, что приводит к возникновению термических напряжений. В массивных бетонных блоках тепловыделение может быть настолько боль-

шим, что разница температуры между средней частью и поверхностью бетона создает растягивающие напряжения, превышающие его предел прочности при растяжении в раннем возрасте, в результате чего на их поверхности появляются трещины, которые имеют тенденцию дальнейшего распространения внутрь. Возникновение трещин в бетоне нарушает целостность конструкций, снижает несущую способность, способствует коррозии арматуры, что в конечном итоге сокращает срок их службы. Поэтому определение теплоты гидратации цемента и с помощью этого прогнозирование роста температуры и появления термических напряжений в бетонных конструкциях в раннем возрасте твердения бетона необходимы для оценки опасности возникновения трещин и вызываемой ею необходимостью корректировки состава бетонной смеси, а также правильного выбора мероприятий по уходу за твердеющим бетоном [1–3].

Выделение тепла при твердении бетона в результате гидратации цемента можно контролировать и измерять [4, 5]. Изменение интенсивности тепловыделения при гидратации портландцемента показано на рис. 1.

Реакции взаимодействия с водой четырех основных минералов портландцементного клинкера описываются уравнениями [6]:

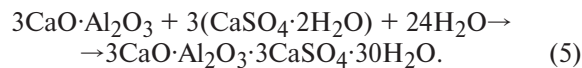


Взаимодействие с водой белита $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S) протекает медленнее, чем алита $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S), и сопровождается меньшим выделением тепла и портландита — свободного гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH), поэтому белит способствует росту прочности цементного камня на более поздней стадии твердения бетона. При этом продукты взаимодействия с водой алита и белита имеют сходный химический состав и состоят по массе соответственно на 61 и 82% из гидросиликатов кальция (CSH) и на 39 и 18% из гидроксида кальция [6].

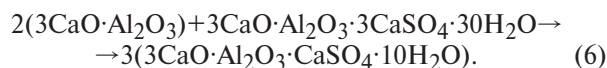
Гидросиликаты кальция имеют аморфную структуру, занимают 50–60% общего объема твердых веществ в гидратированном цементе, образуя непрерывные связи и являясь основными компонентами, придающими прочность цементному камню бетона, в то время как CH является кристаллическим, с гексагональным видом симметрии и не образует связей с другими твердыми фазами. Следовательно, свободный гидроксид кальция не сильно влияет на общую прочность цементного камня и бетона в целом.

Трехкальциевый алюминат $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) очень быстро и бурно реагирует с водой, тем самым вызывая быстрый рост температуры — термическое развитие. Реакция замедляется добавлением двуводного гипса $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, что также способствует устранению явления ложного схватывания. В резуль-

тате добавления гипса при достаточном количестве свободного гидроксида кальция в водной среде образуется эттрингит $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot (30-32)\text{H}_2\text{O}$ — трехсульфатная форма гидросульфалюмината кальция, который способствует набору прочности цементным камнем бетона. Реакцию образования эттрингита в результате взаимодействия C_3A с достаточным количеством гипса можно представить уравнением [6]:



C_3A будет продолжать реагировать с гипсом до тех пор, пока весь гипс не будет израсходован, затем начнет реагировать с эттрингитом с образованием моносульфатной формы гидросульфалюмината кальция по уравнению:



Период 1 (преиндукционный период, или стадия растворения и первичной гидратации).

Химическая реакция происходит сразу после контакта цемента с водой и его частичного растворения и приводит к образованию пленки на поверхности цементных частиц, состоящей из эттрингита и кристаллов портландита, после чего скорость реакции гидратации резко снижается из-за затруднения проникновения молекул воды под образовавшуюся пленку. Эта стадия гидратации цемента очень мало влияет на рост прочности.

Период 2 (индукционный период, или стадия покоя).

В течение этой стадии из-за экранирующего влияния образовавшейся на поверхности клинкерных частиц пленки их взаимодействие с водой будет хотя и значительно медленнее, но все-таки происходить. Это вызывает увеличение в объеме частиц клинкера, гидратируемых с поверхности внутрь, что в сочетании с ростом кристаллов эттрингита и их постепенным переходом из мелких чешуек, покрывающих поверхность частиц сплошной пленкой, в вытянутые иглообразные кристаллы, приводящим к превращению пленки в сетку, способствует надрыву этой сетки и тем самым облегчает доступ воды под надорванную сетку в глубь цементных частиц для их дальнейшей гидратации. При этом цементное тесто еще сохраняет свое пластичное состояние, что имеет решающее значение для сохранения удобоукладываемости бетонной смеси, позволяя транспортировать ее на строительную площадку и укладывать в опалубку с необходимым уплотнением. Эта стадия также не способствует росту прочности.

Период 3 (стадия ускоренной вторичной гидратации).

В цементе начинают гидратироваться и выделять тепло алит и белит. На этом этапе начинается схватывание бетонной смеси, при этом тепловыделение в результате протекания экзотермических реакций происходит быстро и с большим количеством тепла. Прочность в течение этого периода, во время кото-

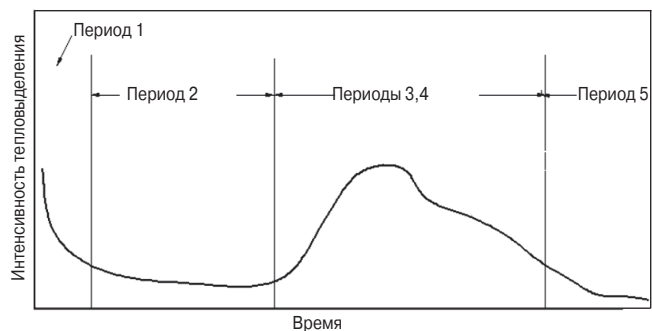


Рис. 1. Изменение интенсивности тепловыделения при гидратации портландцемента

Fig. 1. Change in heat release intensity during hydration of Portland cement

рого заканчивается схватывание бетонной смеси и начинается твердение бетона, нарастает ускоренно. Поэтому эта стадия играет очень важную роль в процессе структурирования бетона.

Период 4 (стадия замедленной вторичной гидратации).

Скорость гидротермального тепловыделения снижается, и тепловыделение переходит в управляемый диффузионный процесс. В течение этого периода увеличивается объем гидратированных цементных частиц и уменьшается площадь их негидратированной поверхности. При этом гидратированный слой действует как диффузионная поверхность и играет важную роль для дальнейшего проникновения воды, а этрингит переходит в моносульфатную форму гидросульфатоалюмината кальция.

Период 5 (стадия стабилизации структуры бетона).

Гидратированный слой на поверхности цементных частиц утолщается, что значительно снижает скорость гидротермального тепловыделения, и дальнейшая гидратация цемента полностью контролируется диффузией воды.

После укладки и уплотнения бетонной смеси температура в твердеющем бетонном блоке будет постоянно повышаться из-за гидратации вяжущего, а из-за плохой теплопроводности бетона выделяющееся тепло концентрируется в центральной части бетонного блока, повышая ее температуру и вызывая возникновение разницы температуры внутри бетонного блока и на его поверхности, где температура ниже. При этом постепенно температура внутри бетонного блока будет снижаться до стабильного уровня.

Используемые материалы и методы

Определение начальной температуры бетонной смеси

Начальная температура бетонной смеси определяется с учетом температуры и содержания ее компонентов по формуле [7, 8]:

$$T_{con} = \frac{C_s(T_g \cdot W_g + T_c \cdot W_c) + T_m \cdot W_m}{C_s(W_g + W_c) + W_m}, \quad (7)$$

где T_{con} – температура бетона после смешивания с сырьевыми материалами, охлажденными до 0°C ; C_s – отношение удельных теплоемкостей цемента и заполнителя, принимаемое равным 0,2; W_g, T_g – соответственно масса в $\text{кг}/\text{м}^3$ и температура в $^\circ\text{C}$ заполнителя; W_c, T_c – то же цемента; W_m, T_m – то же воды.

Фактическая температура может быть выше рассчитанной по формуле (7) из-за влияния теплоты гидратации цемента, теплоты трения при перемешивании сырьевых материалов и механического нагрева смесителя.

Выделение тепла и адиабатическое повышение температуры бетона

Уравнение теплообмена выражается уравнением [9, 10]:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (8)$$

где k – коэффициент проводимости теплоты в единице объема бетона, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; q_v – скорость выделения тепловой энергии за счет гидратации цемента в единице объема, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$; c – удельная массовая теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – возраст бетона на определенный момент времени, сут.

Портландцемент в основном состоит из клинкерных минералов: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , при взаимодействии которых с водой происходят реакции их гидролиза и гидратации, сопровождающиеся выделением тепла. В зависимости от содержания цемента в бетонной смеси и содержания в нем указанных минералов скорость протекания реакций и количество выделяемого тепла будут различны. Поскольку бетон является материалом с низкой теплопроводностью, то тепло, выделяемое в результате гидратации цемента аккумулируется в твердеющем бетонном блоке. С другой стороны, поскольку скорость тепловыделения пропорциональна отношению площади поверхности рассеивания тепла к объему бетона, скорость рассеивания тепла у массивных бетонных блоков намного ниже, чем у обычных бетонных конструкций. Поэтому можно считать, что процесс теплообмена в массивном бетонном блоке при протекании реакции гидратации цемента и твердения бетона является адиабатическим процессом. Количество теплоты, выделяющееся в результате реакции гидратации цемента, является энергией этого процесса, или, другими словами, источником тепла процесса теплообмена в бетоне. В этом случае параметр q_v в формуле (8) можно считать источником тепловыделения в единице объема твердеющего бетона. На прошедшей в 1985 г. в Японии, в г. Токио научной конференции по анализу железобетонных конструкций методом конечных элементов Танабэ предложил формулу для определения источника тепла q в твердеющем массивном бетонном блоке и математическое выражение закона повышения температуры в его сегменте (уравнения (9) и (10)), которые в 1986 г. были признаны Американским обществом инженеров-строителей (ASCE) [11–13]:

$$q = \frac{1}{24} \cdot \rho \cdot C \cdot K \cdot e^{-\frac{\alpha x \tau}{24}}; \quad (9)$$

$$T_{ad} = K \cdot (1 - e^{-\alpha x \tau}), \quad (10)$$

где q – тепловыделение в единице объема твердеющего бетона, $\text{кДж}/\text{м}^3$; ρ – средняя плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; C – удельная массовая теплоемкость бетона, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; τ – время, сут; α – коэффициент, показывающий степень гидратации цемента; K – максимальная температура бетона в адиабатических условиях, $^\circ\text{C}$; T_{ad} – температура бетона в адиабатическом состоянии в возрасте τ сут, $^\circ\text{C}$.

Таким образом, если знать значения K и α , можно рассчитать удельное объемное тепловыделение q и исходя из этого определить температурное поле в твердеющем бетонном блоке. Однако расчет K и α затруднен, так как выделение тепла происходит

Таблица 1
Table 1

Коэффициенты для расчета
адиабатической температуры
Coefficients for calculating adiabatic temperature

Вид вяжущего	Температура бетонной смеси, °С	$T(t) = K(1 - e^{-at})$			
		$K(C) = aC + b$		$\alpha(C) = gC + h$	
		a	b	g	h
Портландцемент	10	0,12	11	0,0015	0,135
	20	0,11	13	0,0038	-0,036
	30	0,11	12	0,004	0,337
Портландцемент с частичной заменой золой-уноса ТЭС	10	0,15	-3	0,0007	0,141
	20	0,12	8	0,0028	-0,143
	30	0,11	11	0,003	0,059

Примечания: C – содержание цемента в 1 м^3 бетонной смеси; a, b, g и h – экспериментально определенные коэффициенты.

Таблица 2
Table 2

Расчетные формулы при изменении содержания цемента от 250 до 400 кг/м³
Calculation formulas for changing cement content from 250 kg/m³ to 400 kg/m³

Функции	250 кг/м ³ $X \leq 400 \text{ кг/м}^3$	
$T_{\infty} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = 17,5 + 0,113X$	$b_{AT} = -0,146 + 3,08 \cdot 10^{-4} X$
$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = -0,426 + 2,07 \cdot 10^{-3} X$	$b_{AT} = 0,0471 + 1,88 \cdot 10^{-5} X$
$s_{AT} = 1$		
$\tau_{0,Q} = a_{AT} \exp(-b_{AT} T_a)$	$a_{AT} = 0,832 - 5,31 \cdot 10^{-4} X$	$b_{AT} = 0,0482 + 6,8 \cdot 10^{-5} X$

Примечание. T_a – начальная температура бетонной смеси, °С.

Таблица 3
Table 3

Расчетные формулы при изменении содержания цемента от 400 до 550 кг/м³
Calculation formulas for changing cement content from 400 kg/m³ to 550 kg/m³

Функции	400 кг/м ³ <math>W_c < 550 \text{ кг/м}^3</math>	
$T_{\infty} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = 40 + 0,057 W_c$	$b_{AT} = -0,146 + 3,08 \cdot 10^{-4} W_c$
$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = -0,426 + 2,07 \cdot 10^{-3} W_c$	$b_{AT} = 0,0471 + 1,88 \cdot 10^{-5} W_c$
$s_{AT} = 1$		
$\tau_{0,Q} = a_{AT} \exp(-b_{AT} T_a)$	$a_{AT} = 0,832 - 5,31 \cdot 10^{-4} W_c$	$b_{AT} = 0,0482 + 6,8 \cdot 10^{-5} W_c$

в течение длительного времени и зависит от многих факторов. Результаты многих экспериментальных исследований показали, что значения K и α напрямую зависят от содержания цемента, его минерального состава и температуры бетонной смеси при ее укладке. При одинаковом цементе, с ростом его содержания в бетонной смеси и температуры смеси, значения K и α также увеличиваются. Таким образом, для снижения температуры в твердеющем бетонном блоке необходимо уменьшить содержание цемента и понизить начальную температуру бетонной смеси.

Экспериментально получены значения K и α , в зависимости от вида и содержания цемента в 1 м^3 бетонной смеси и ее температуры, можно найти в корейском стандарте [7].

Таблица 4
Table 4

Составы бетонных смесей
Compositions of concrete mixtures

Маркировка состава	Содержание сырьевых материалов, кг/м ³				
	Портландцемент	Зола-уноса ТЭС	Вода	Кварцевый песок	Щебень
M ₁	440	0	189	770	1022
M ₂	297	143	194	774	968

Таблица 5
Table 5

Расчетная адиабатическая температура бетона из смеси M₁
Calculated adiabatic temperatures of concrete from mixture M₁

$\tau, \text{ч}$	При $T_a = 10^\circ\text{C}$		При $T_a = 20^\circ\text{C}$		При $T_a = 30^\circ\text{C}$	
	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту
0	10	10	20	20	30	30
12	20,93	13,59	34,3	29,14	38,97	39,71
24	34,99	34,41	49,44	48,75	52,63	56,2
36	44,44	46,79	56,12	57,6	57,42	61,84
48	50,79	54,15	59,07	61,59	59,09	63,76
60	55,06	58,54	60,37	63,39	59,68	64,42
72	57,92	61,14	60,95	64,2	59,89	64,65
84	59,85	62,7	61,2	64,57	59,96	64,73
96	61,15	63,62	61,31	64,73	59,99	64,75
108	62,02	64,17	61,36	64,81	59,99	64,76
120	62,61	64,5	61,38	64,84	59,99	64,76
132	62,99	64,69	61,39	64,86	59,99	64,77
144	63,26	64,81	61,3	64,86	59,99	64,77
156	63,44	64,87	61,4	64,87	59,99	64,77
168	63,56	64,92	61,4	64,87	59,99	64,77
180	63,64	64,94	61,4	64,87	59,99	64,77
192	63,69	64,95	61,4	64,87	60	64,77
204	63,73	64,96	61,4	64,87	60	64,77
216	63,75	64,97	61,4	64,87	60	64,77
228	63,77	64,97	61,4	64,87	60	64,77
240	63,78	64,97	61,4	64,87	60	64,77

По данным Японского института бетона, температура в центре твердеющего бетонного массива в адиабатическом режиме рассчитывается по формуле (11) на основе полученных экспериментальных результатов [11, 14]:

$$T_{\tau} = T_{\infty} \cdot \left[1 - e^{-r_{AT} \cdot (\tau - \tau_{0,Q})^{s_{AT}}} \right], \quad (11)$$

где T_{τ} – адиабатическая температура бетона в возрасте τ сут, °С; T_{∞} – максимальная температура бетона в адиабатических условиях, °С; r_{AT} , s_{AT} – параметры, показывающие скорость изменения температуры;

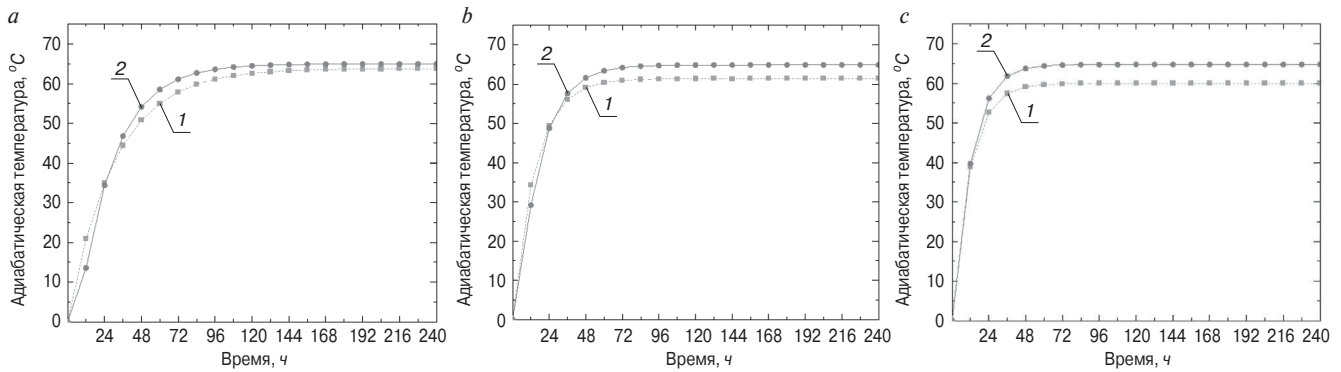


Рис. 2. Повышение адиабатической температуры бетона из смеси M1, рассчитанное по корейскому (1) и японскому (2) стандартам: а – при $T_a=10^\circ\text{C}$; б – при $T_a=20^\circ\text{C}$; с – при $T_a=30^\circ\text{C}$

Fig. 2. Increase in adiabatic temperature of concrete from M1 mixture, calculated according to Korean (1) and Japanese (2) standards: a – at $T_a=10^\circ\text{C}$; b – at $T_a=20^\circ\text{C}$; c – at $T_a=30^\circ\text{C}$

τ – возраст бетона, сут; $\tau_{0,Q}$ – время начала тепловыделения в адиабатических условиях, сут.

Величины T_∞ , r_{AT} , s_{AT} , $\tau_{0,Q}$ в формуле (11) устанавливаются в зависимости от температуры бетонной смеси при укладке и при изменении расхода цемента рассчитываются по формулам, приведенным в табл. 2 и 3.

Кроме того, в настоящее время существует множество других методов определения величины адиабатической температуры. В данной работе для определения данной величины были использованы две эмпирические формулы из корейского и японского стандартов [7, 11, 15].

Результаты и обсуждение

Для изучения адиабатического процесса с помощью расчетных формул Корейского и Японского институтов бетона, приведенных выше, рассмотрим две бетонные смеси, составы которых приведены в табл. 4: с золой-уноса ТЭС, заменяющей часть портландцемента в составе вяжущего, и без нее. Начальная температура указанных бетонных смесей T_a составляла 10, 20 и 30°C. Изготовленные из них бетонные образцы имели форму кубов размером 150×150×150 мм.

Повышение адиабатической температуры в процессе схватывания бетонной смеси состава M1 и твердения получаемого из нее бетона

Результаты расчета по корейскому и японскому стандартам повышения адиабатической температуры в процессе схватывания бетонной смеси M1 и твердения полученного из нее бетона приведены в табл. 5.

Из полученных результатов изменения адиабатической температуры во времени можно сделать следующие выводы.

Адиабатические температурные кривые бетона, полученного из бетонной смеси M1, зависят от вида и содержания вяжущего и начальной температуры бетонной смеси. При этом кривая адиабаты, рассчитанная по корейской эмпирической формуле, с ростом возраста бетона располагается ниже кривой

Таблица 6
Table 6
Расчетная адиабатическая температура бетона из смеси M²
Calculated adiabatic temperatures of concrete from mixture M²

$\tau, \text{ч}$	При $T_a=10^\circ\text{C}$		При $T_a=20^\circ\text{C}$		При $T_a=30^\circ\text{C}$	
	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту
0	10	10	20	20	30	30
12	11,6	18	20,52	30,91	30,81	38,35
24	16,07	27,18	26,68	39,06	31,86	44,08
36	19,84	33,68	31,12	43,49	35,81	46,48
48	23,01	38,27	34,3	45,9	38,3	47,48
60	25,69	41,52	36,59	47,22	39,88	47,9
72	27,95	43,81	38,24	47,93	40,87	48,08
84	29,85	45,43	39,42	48,32	41,49	48,15
96	31,45	46,58	40,27	48,53	41,89	48,18
108	32,8	47,39	40,88	48,64	42,14	48,19
120	33,94	47,97	41,32	48,7	42,3	48,2
132	34,9	48,37	41,63	48,74	42,4	48,2
144	35,71	48,66	41,86	48,76	42,46	48,2
156	36,39	48,86	42,02	48,77	42,5	48,2
168	36,97	49,01	42,14	48,77	42,53	48,2
180	37,45	49,11	42,22	48,78	42,54	48,2
192	37,86	49,18	42,29	48,78	42,56	48,2
204	38,2	49,23	42,33	48,78	42,56	48,2
216	38,49	49,27	42,36	48,78	42,56	48,2
228	38,74	49,29	42,38	48,78	42,57	48,2
240	38,81	49,3	42,39	48,78	42,57	48,2

адиабаты, рассчитанной по японской формуле (рис. 2). Однако характер этих кривых сходный и максимальное расхождение, соответствующее случаю, когда начальная температура бетонной смеси была 10°C, составляет 7,34°C после ее 12-часового твердения (табл. 5).

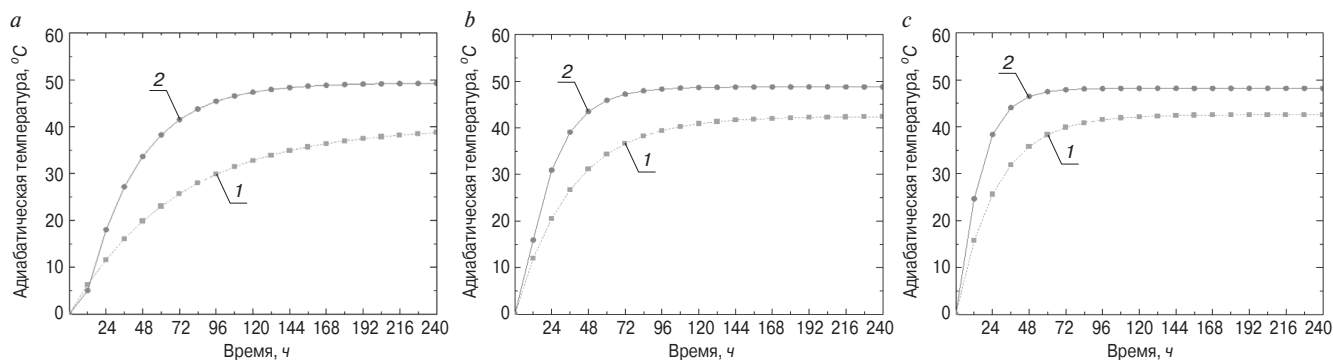


Рис. 3. Повышение адиабатической температуры бетона из смеси M_2 , рассчитанное по корейскому (1) и японскому (2) стандартам: *a* – при $T_a=10^\circ\text{C}$; *b* – при $T_a=20^\circ\text{C}$; *c* – при $T_a=30^\circ\text{C}$
Fig. 3. Increase in adiabatic temperature of concrete from M_2 mixture, calculated according to Korean (1) and Japanese (2) standards: *a* – at $T_a=10^\circ\text{C}$; *b* – at $T_a=20^\circ\text{C}$; *c* – at $T_a=30^\circ\text{C}$

Рост адиабатической температуры в ходе схватывания бетонной смеси состава M_2 и твердения получаемого из нее бетона

Результаты расчета по корейскому и японскому стандартам роста адиабатической температуры в ходе схватывания бетонной смеси M_2 и твердения полученного из нее бетона приведены в табл. 6.

Из полученных результатов изменения адиабатической температуры во времени, вычисленных по эмпирическим формулам корейского и японского стандартов, можно сделать следующие выводы.

Значения адиабатической температуры бетона, полученного из бетонной смеси M_2 , содержащей меньше портландцемента в составе вяжущего вещества за счет частичной замены цемента золой-уноса ТЭС, при всех исследованных начальных температурах бетонных смесей существенно ниже, чем у бетона из бетонной смеси M_1 , содержащей в составе вяжущего только портландцемент.

Адиабатические температурные кривые бетона, полученного из бетонной смеси M_2 , так же как и в случае бетона, полученного из бетонной смеси M_1 , зависят от вида и содержания вяжущего и начальной температуры бетонной смеси, и также кривая адиабаты, рассчитанная по корейской эмпирической формуле, ниже кривой адиабаты, рассчитанной по японской формуле при сходном характере этих кривых (рис. 3). При этом максимальное расхождение составляет $15,83^\circ\text{C}$ и наблюдается при начальной температуре бетонной смеси 10°C , в возрасте бетона 3 и 3,5 сут (соответственно 72 и 84 ч) (табл. 6).

Выводы

На основе полученных результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Содержание и состав вяжущего, а также начальная температура бетонной смеси определяют адиабатическую температуру в твердеющем бетоне. При этом максимальная температура достигается к 72–96 ч твердения бетона.
2. Расчетная адиабатическая температура, определенная по корейскому и японскому стандартам, имеет отличия. Причем разница между значениями

температуры уменьшалась с возрастом твердения бетона. Также установлено, что при использовании вяжущего, в котором часть портландцемента заменена золой-уноса ТЭС, указанная разница более существенна и этот факт следует учитывать на практике при выборе расчетной методики.

Список литературы / References

1. Нгуен Чонг Чык. Термонапряженное состояние бетонных гравитационных плотин: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 159 с.
1. Nguyen Trong Chuc. Thermal stress state of concrete gravity dams. Diss... Candidate of Sciences (Engineering). Moscow. 2020. 159 p. (In Russian).
2. Нгуен Чонг Чык, Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Булычева А.С., Макарова М.Н. Оценка возможности появления трещин в мостовой опоре автомобильной эстакады в раннем возрасте твердения бетона // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 10. С. 33–42. DOI: 10.12737/article_5bd95a725020e3.98104960
2. Nguyen Trong Chuc, Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Alexandrova O.V., Larsen O.A., Bulycheva A.S., Makarova M.N. Assessment of the possibility of cracks in the bridge support of the road overpass in the early age concrete. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 10, pp. 33–32. (In Russian). DOI: 10.12737/article_5bd95a725020e3.98104960
3. ACI Committee 207 – Mass and thermally controlled concrete. 2017. 34 p.
4. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 1. С. 99–110.
4. Lotov V.A. Interaction of cement particles with water or mechanism of hydration and hardening of cement. *Vestnik of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. Vol. 329. No. 1, pp. 99–110. (In Russian).
5. Разумейчик В.С. Структурно-химическое моделирование гидратации цементного композита // *Вестник Брестского государственного технического*

- ниверситета. Сер. Строительство и архитектура. 2006. № 1. С. 91–96.
5. Razumeychik V.S. Structural-chemical modeling of hydration of cement composite. *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Construction and architecture*. 2006. No. 1, pp. 91–96. (In Russian).
 6. Фомина Н.Н., Кебедов М.Б. Применение методов калориметрии в исследовании процессов гидратации портландцемента // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2016. № 1 (15). С. 26–28.
 6. Fomina N.N., Kebedov M.B. Application by calorimetry in the study of cement hydration arts. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2016. No. 1 (15), pp. 26–28. (In Russian).
 7. Korea Concrete Institute. Thermal crack control of mass concrete (Manual). 2010. 234 p.
 8. Barbara K., Maciej B., Maciej P., Aneta Z. Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193, pp. 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.209>
 9. Nikolay Aniskin, Nguyen Trong Chuc, Hoang Quoc Long. Influence of size and construction schedule of massive concrete structures on its temperature regime. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. 02014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102014>
 10. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure. *Structural Integrity and Life*. 2019. Vol. 19. No. 1, pp. 8–12.
 11. Japan Concrete Institute. Guidelines for control of cracking of mass concrete. 2016. 302 p.
 12. Кузнецова Т.В., Талабер Й. Глиноземистый цемент. М.: Стройиздат, 1988. 272 с.
 12. Kuznetsova T.V., Talaber I. Glinozemisty tsement [Alumina cement]. Moscow: Stroizdat. 1988. 272 p.
 13. 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>
 14. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 524 с.
 14. Bazhenov Yu. M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: ASV. 2011. 524 p.
 15. 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
 15. 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 of MSUCE*. 2019. No. 8, pp. 991–1003. (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Авторы: А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, С.Г. Богов, В.А. Шашкин, М.А. Шашкин
(практическое руководство под редакцией д.г.-м.н. Шашкина А.Г.)
Санкт-Петербург: Геореконструкция, 2021. 640 с.

В монографии раскрывается содержание мониторинга механической безопасности при новом строительстве, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений. Показывается значение мониторинга не только как средства контроля за сохранностью городской застройки, но и как профилактического средства, позволяющего своевременно обнаружить и диагностировать негативные тенденции и принять адекватные меры по нормализации технического состояния сооружения. Отмечается необходимость построения мониторинга как интерактивного процесса, базирующегося на компьютерной модели взаимодействия сооружения и основания. Это позволяет корректно интерпретировать результаты мониторинга, а также выполнять обратные расчеты для совершенствования исходных расчетных схем и физических моделей материалов и грунтов.



По вопросам приобретения обращайтесь:
E-mail: geoconstruction@gmail.com WWW: geo-bookstore.ru

Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г.,
Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.
Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов
Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.



По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»

А.М. БАХРАХ, инженер, аспирант (antonbahrah@mail.ru),
О.А. ЛАРСЕН, канд. техн. наук, доцент (larsen.oksana@mail.ru),
С.В. САМЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор

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

Влияние количества токопроводящего компонента на удельное электрическое сопротивление мелкозернистого электропроводного бетона

Рассмотрены подходы к получению электропроводного бетона и возможности его применения за счет использования электро-технических свойств в различных отраслях промышленности. Представлены результаты испытаний составов мелкозернистого самоуплотняющегося бетона на основе портландцемента ЦЕМ I 52,5Н, песка с модулем крупности $M_k=2,43$ и поликарбоксилатного пластификатора на предмет изменения удельного электрического сопротивления в процессе твердения. Повышение удельной электрической проводимости обеспечивалось введением в различном количестве токопроводящих компонентов, таких как строительная сажа, технический углерод К-354, графит ЭУТ-2. Показано положительное влияние увеличения количества токопроводящего компонента на удельное электрическое сопротивление на 28-е сут нормального твердения образцов и на способность к резистивному нагреву по изменению температуры поверхности образцов при пропускании постоянного тока с напряжением 30 В.

Ключевые слова: токопроводящий бетон, удельное электрическое сопротивление, резистивный нагрев, портландцемент, постоянный ток.

Для цитирования: Бахрах А.М., Ларсен О.А., Самченко С.В. Влияние количества токопроводящего компонента на удельное электрическое сопротивление мелкозернистого электропроводного бетона // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-46-51>

A.M. BAKHRAH, Engineer, Graduate Student (antonbahrah@mail.ru),
O.A. LARSEN, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor (larsen.oksana@mail.ru),
S.V. SAMCHENKO, Doctor of Sciences (Engineering), Professor
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Influence of the Amount of Conductive Component on the Electrical Resistivity of Fine-Grained Electrically Conductive Concrete

Approaches to the production of electrically conductive concrete and the possibility of its application through the use of electrical properties in various industries are considered. The results of testing the compositions of fine-grained self-compacting concrete based on Portland cement CEM I 52.5 N, sand with a size modulus $M_k=2.43$ and polycarboxylate plasticizer for changes in electrical resistivity during hardening are presented. The increase in specific electrical conductivity was provided by the introduction of conductive components in various quantities, such as construction soot, carbon black K-354, graphite EUT-2. The positive effect of increasing the amount of the conductive component on the electrical resistivity for 28 days of normal hardening of the samples and on the ability to resistive heating by changing the surface temperature of the samples when passing a direct current with a voltage of 30 V. is shown.

Keywords: conductive concrete, electrical resistivity, resistive heating, Portland cement, direct current.

For citation: Bakhrakh A.M., Larsen O.A., Samchenko S.V. Influence of the amount of conductive component on the electrical resistivity of fine-grained electrically conductive concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 46–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-46-51>

В настоящее время мостовые сооружения, эксплуатируемые при пониженной температуре в течение года, испытывают образование отложений на их покрытиях в виде рыхлого снега, снежного наката и стекловидного льда, что приводит к снижению безопасности при их эксплуатации. Для устранения обледенения верхнего слоя мостовых сооружений применялись различные способы, которые отличались либо высокой стоимостью, либо не соответствовали требованиям прочности покрытия. Для устранения образования отложений при пониженной температуре на поверхности покрытия мостовых сооружений в настоящее время применяются химические реагенты, укладываются изоляционные материалы, прокладываются нагревательные элементы между слоями покрытия [1].

Для устранения обледенения в качестве реагентов нередко используется хлорид натрия, который оказывает негативное влияние не только на долговечность бетона, приводящее к его коррозии, но и к загрязнению окружающей среды в придорожных слоях почвы и сточных водах [2–4].

Одним из способов снижения использования реагентов, предотвращения промерзания земляного полотна за рубежом явилось применение теплоизоляционного материала в виде плитного пенополистирола для снижения теплопотерь с поверхности, предотвращения образования льда, а также сокращения количества циклов замораживания-оттаивания в дорожных покрытиях и взлетно-посадочных полосах аэродромов.

Системы подогрева представляют собой встроенные резистивные электронагреватели или трубы, по которым проходит горячий носитель в виде жидкости или газа, содержащих нагретую жидкость [5].

Для устранения обледенения дорожных покрытий в нашей стране проводилось много исследований, значительная часть которых посвящена разработке составов электропроводных бетонов [6–10].

Области применения электропроводного бетона обширны. Его можно применять в качестве электромагнитной защиты, часто необходимой при проектировании и строительстве объектов и оборудования для защиты электрических систем или электронных компонентов; для защиты от радиации в атомной промышленности; в качестве материала в антистатических напольных покрытиях в электронной приборостроительной промышленности и больницах; в качестве катодной защиты стальной арматуры в бетонных конструкциях.

Получение электропроводного бетона основано на использовании минерального вяжущего или полимерного связующего в качестве матрицы, в объеме которой будет распределен токопроводящий компонент для достижения необходимой и относительно высокой электропроводности. В качестве токопроводящего компонента имеет место применение фибры, а также электропроводные заполнители и наполнители. Дисперсно-армированный токопроводящий бетон с электропроводной фиброй имеет высокую механическую прочность, но более низкую электропроводность при значении удельного электрического сопротивления около 1 Ом·м, что объясняется небольшой площадью контакта фибры друг с другом. Электропроводный бетон с токопроводящим наполнителем обладает более высокой проводимостью при значении удельного сопротивления от 0,1 до 0,3 Ом·м, но имеет относительно невысокую прочность при сжатии, составляющую около 25 МПа и менее. Невысокие прочностные показатели объясняются высоким водоцементным отношением, необходимым для обеспечения технологических свойств бетонов и равномерного распределения тонкодисперсных токопроводящих наполнителей [11, 12].

Наибольшее распространение получили токопроводящие бетоны на основе портландцементного вяжущего с использованием токопроводящих наполнителей ввиду повышенной огнестойкости и долговечности и невысокой стоимости. Вместе с тем генезис и развитие структуры цементного камня является многосторонним процессом, определяющим склонность к расширению либо усадке. Технология приготовления цементного электропроводного бетона заключается в приготовлении бетонной смеси с токопроводящим компонентом, включающим технический углерод [13], кокс [14], углеродную и металлическую фибру, металлическую стружку [15], углеродные нанотрубки [16, 17], графит [18], а также их комбинированное применение [19].

Взаимное расположение в цементной матрице токопроводящих компонентов, их ориентация и содержание оказывают значительное влияние на проводимость бетона. Содержание металлической фибры в электропроводном бетоне ограничивается 3 мас. %, в то время как введение графитовых нановолокон, графена и углеродных нанотрубок составляет около 1% по объему. Имеется опыт получения электропроводного бетона на основе совместного использования металлической стальной фибры и стальной стружки, вводимых в состав бетона в количестве 1–3 и 5–40% по объему соответственно. При этом был получен токопроводящий бетон, обладающий удельным электрическим сопротивлением 0,01–0,4 Ом·м и прочностью при сжатии более 30 МПа. Для повышения электрической проводимости цементного бетона возможно введения карбоновой фибры, которая позволила получить электрическое сопротивление $20,7 \pm 0,4$ Ом·м. Также в качестве токопроводящего компонента применяется углеродная фибра в количестве 2% от массы вяжущего, позволяющая достичь показатели удельного электрического сопротивления бетона 0,45–0,55 Ом·м.

Исследования в области получения электропроводных материалов, проведенные до настоящего времени на территории СССР и Российской Федерации в данной области, основаны большей частью на повышении проводимости цементных бетонов за счет введения тонкодисперсных компонентов на основе углерода – сажи, технического углерода, коксового угля и коксовой пыли. Существенное влияние уделяется параметру структурности технического углерода, оказывающего существенное влияние на образование проводящего кластера со свойствами проводника, т. е. между частицами токопроводящего компонента должна устанавливаться связь в виде соприкосновения друг с другом для обеспечения проводимости.

Целью данного исследования явилось изучение влияния различных токопроводящих наполнителей, их сочетаний и различного содержания в композите на удельное электрическое сопротивление мелкозернистого электропроводного бетона, а также способность к резистивному нагреву поверхности в лабораторных условиях.

Материалы и методы

В работе использовались материалы:

- портландцемент Цем1 42,5 Н ООО «Холсим (РУС) СМ» по ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»;
- технический углерод марки К-354 по ГОСТ 7885–86 «Углерод технический для производства резины. Технические условия»;
- пластификатор Sika E55 на основе эфиров поликарбоксилатов;
- строительная сажа;
- крупный песок I класса согласно ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»;

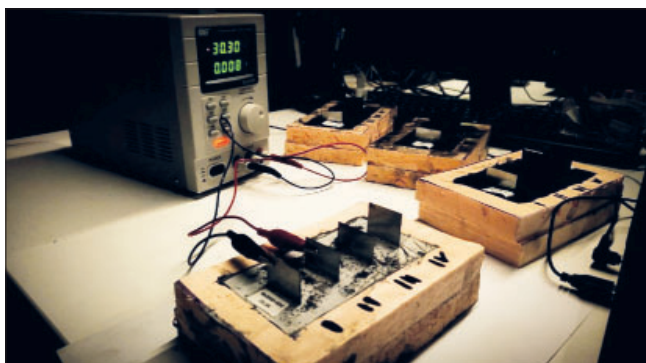


Рис. 1. Измерение силы тока в образце
Fig. 1. Measuring the current in the sample

– графит ЭУТ-2 по ГОСТ 10274–79 «Графит для производства электроугольных изделий. Технические условия»;

– вода затворения по ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Удельное объемное электрическое сопротивление рассчитывалось на основании значений абсолютного сопротивления образцов, которые были получены расчетным путем, исходя из закона Ома для участка цепи на основании показателей силы тока при подаче к электродам, помещенным в образец, постоянного тока с напряжением 30 В (рис. 1), с использованием источника постоянного тока QJE QJ3005P. Величина напряжения, равная 30 В, была выбрана на основании того, что является верхним пределом напряжения для используемого прибора. При этом верхний предел силы тока прибора составлял 5А.

Способность к резистивному нагреву определялась по изменению температуры поверхности образца при подключении его к постоянному току с напряжением 30 В в возрасте 28 сут нормального твердения. Измерения проводились в течение 2,5 ч с момента подачи напряжения к образцу с интервалом в 30 мин. Температура поверхности измерялась с помощью лазерного пирометра KBT KT 655 PROLINE; точка измерения выбиралась между электродами, к которым подключался источник постоянного тока.

Результаты исследования

Мелкозернистая бетонная смесь приготавливалась в лабораторном смесителе планетарного типа. Подвижность смеси определялась по расплыву конуса Хагермана, все образцы изготавливались из теста с расплывом 250 мм. Количество воды было выбрано для обеспечения водоцементного отношения 0,3, а количество пластифицирующей добавки подбиралось таким образом, чтобы при увеличении количества высокодисперсных токопроводящих компонентов обеспечить сохранение водоцементного отношения смеси.

Смесь укладывалась в формы без уплотнения, поверхность заглаживалась шпателем. До начала схватывания бетонной мелкозернистой смеси в форму на

одинаковом расстоянии помещались контактные металлические пластины для подключения к источнику постоянного тока. Схватывание и твердение образцов осуществлялось в камере нормального твердения с температурой 20°C и влажностью 95%.

В качестве контрольного образца был выбран состав мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с соотношением цемента и песка: Ц:П=1:2, В/Ц=0,3 и суперпластификатора в количестве 1% от массы цемента. Для повышения проводимости мелкозернистого бетона в состав вводились углеродные токопроводящие компоненты в различных количествах: технический углерод ТУ К-354 в количестве 1; 2,5 и 5% от массы цемента; строительная сажа в количестве 5; 10 и 15% от массы цемента; графит ЭУТ-2 в количестве 3, 7 и 13% от массы цемента. Для оценки совместного влияния на удельную электрическую проводимость мелкозернистого бетона были испытаны составы с попарным введением токопроводящих компонентов, в количестве 1,5 и 3% от массы цемента для технического углерода ТУ К-354, строительной сажи и графита ЭУТ-2 соответственно. Испытанные составы приведены в таблице.

После 28 сут твердения в нормальных условиях образцы были извлечены из камеры нормального твердения. После выдержки в течение 4 ч было определено удельное электрическое сопротивление согласно методике, описанной выше. Установлено, что образец контрольного состава показал наибольшее значение удельного электрического сопротивления, которое составило 303 Ом·м. Наименьшим сопротивлением обладал образец с содержанием 13% графита ЭУТ-2: 43,28 Ом·м. Наименьшую эффективность снижения удельного электрического сопротивления показала строительная сажа. Увеличение количества ее содержания с 10 до 15% не привело к дальнейшему снижению удельного электрического

Составы образцов
Sample compositions

№ образца	ТУ К-354, % от Ц	Строительная сажа, % от Ц	Графит ЭУТ-2, % от Ц	В/Ц	Расплыв формы-конуса, мм
1	0	0	0	0,3	250
2	1			0,3	250
3	2,5			0,3	250
4	5			0,3	250
5		5		0,3	250
6		10		0,3	250
7		15		0,3	250
8			3	0,3	250
9			7	0,3	250
10			13	0,3	250
11	1	5		0,3	250
12		5	3	0,3	250
13	1		3	0,3	250

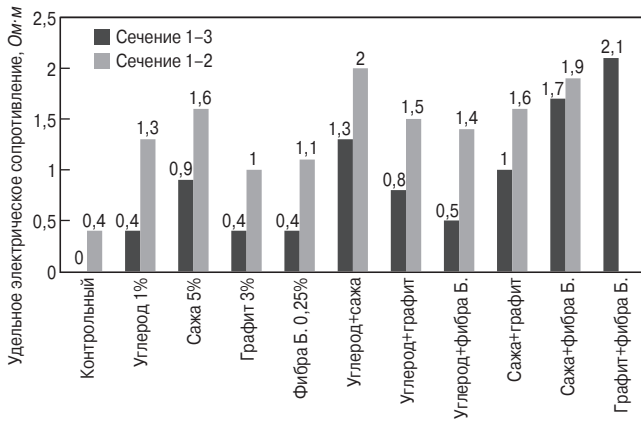


Рис. 2. Сравнение удельного электрического сопротивления составов № 1–13 (табл. 1) в зависимости от количества и вида токопроводящих компонентов по одинарным сечениям

Fig. 2. Comparison of the electrical resistivity of compositions No. 1–13 (Table 1) depending on the number and type of conductive components for single sections

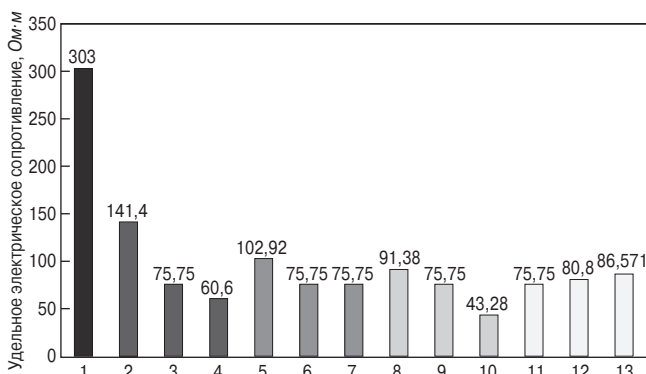


Рис. 3. Сравнение способности к резистивному нагреву в зависимости от количества и вида токопроводящих компонентов при пропускании постоянного тока 30 В

Fig. 3. Comparison of resistance heating ability depending on the number and type of conductive components when passing 30 V

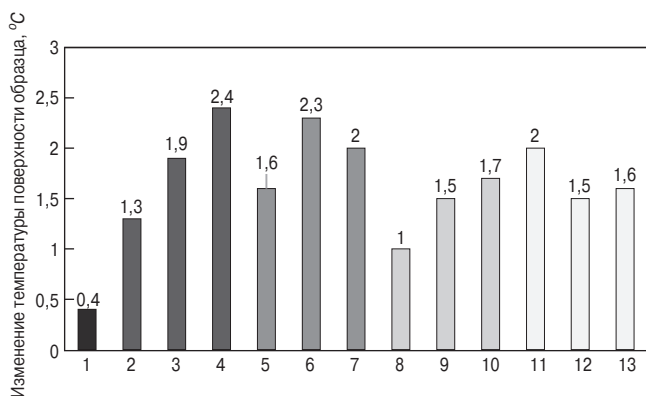


Рис. 4. Зависимость максимального изменения температуры поверхности от удельного электрического сопротивления при пропускании постоянного тока 30 В

Fig. 4. Dependence of the maximum change in surface temperature on electrical resistivity when passing a direct current of 30 V

сопротивления. Составы 6 и 7 (см. таблицу) показали 75,75 Ом·м. Для наполнителей ТУ К-354 и ЭУТ-2 в выбранном при испытании диапазоне расхода удельное электрическое сопротивление оказалось в прямой зависимости от количества компонентов. Совместное введение токопроводящих компонентов

привело к дополнительному снижению сопротивления по сравнению с раздельным способом введения компонентов в выбранных минимальных соотношениях (рис. 2).

В результате исследования установлено увеличение способности образцов к резистивному нагреву при совместном введении токопроводящих компонентов. Установлена прямая зависимость температуры нагрева от количества токопроводящего компонента. Способность образцов к резистивному нагреву определялась по величине изменения температуры поверхности через 2,5 ч после приложения постоянного тока с напряжением 30 В. Наименьшую способность к нагреву продемонстрировал контрольный образец, температура его поверхности поднялась на 0,4°C. Наивысший результат был получен у состава, содержащего ТУ К-354, температура которого поднялась на 2,4°C.

Анализ зависимости изменения температуры поверхности образцов от их удельного электрического сопротивления (рис. 4) позволяет предположить, что она носит прямо пропорциональный характер для одного вида токопроводящего компонента, т. е. с увеличением количества наполнителя повышается проводимость и температура. При сравнении образцов с разными наполнителями токопроводящих компонентов, имеющих при этом одинаковую проводимость, можно сделать вывод, что при одинаковой проводимости и различном виде применяемого токопроводящего наполнителя температура будет выше при большем содержании токопроводящего компонента. Результаты нагрева образцов с различными видами токопроводящего компонента при одинаковой удельной электрической проводимости при этом отличаются. На величину нагрева поверхности при одинаковом удельном электрическом сопротивлении оказывает влияние количество токопроводящего компонента в зависимости от его вида.

При снижении удельного электрического сопротивления повышается способность к резистивному нагреву. Образцы, обладающие меньшим электрическим сопротивлением, нагреваются больше. При этом, из образцов с разными токопроводящими компонентами, имеющими одинаковое удельное электрическое сопротивление, больше нагрелись те образцы, в которых содержание наполнителя было выше.

Выводы

1. Получены составы мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси с повышенной электрической проводимостью с использованием технического углерода ТУ К-354, строительной сажи, графита ЭУТ-2 и их сочетаний. Введение указанных компонентов и их сочетаний позволяет получить композиционный материал, обладающий по сравнению с обычным бетоном пониженным удельным электрическим сопротивлением, а также способностью к резистивному нагреву при пропускании постоянного тока.

2. Изучено влияние количества токопроводящих компонентов на величину удельного электрического сопротивления бетона в возрасте 28 сут. Показано снижение удельного электрического сопротивления для всех видов токопроводящих компонентов при повышении их содержания, что объясняется увеличением количества контактов между частицами и, как следствие, ростом количества проводящих связей внутри матрицы из цементного камня.

3. Показано, что совместное попарное введение технического углерода ТУ К-354, строительной сажи и графита ЭУТ-2 оказывает положительное влияние на величину удельного электрического сопротивления и способность к резистивному нагреву за счет более плотной упаковки частиц токопроводящих компонентов, обеспечивающей получение большего количества токопроводящих цепочек.

4. Полученные результаты позволяют предположить, что существенным фактором, влияющим на способность к нагреву, помимо удельного электрического сопротивления, является и количество токопроводящего компонента, по всей видимости, оказывающего влияние на процесс теплопереноса. Отмечено отсутствие прямой зависимости величины удельного электрического сопротивления от способности к резистивному нагреву при сравнении образцов на основании различных токопроводящих компонентов.

Список литературы / References

1. Гриневич С.В., Лысенко В.Е. Технология устройства антигололедного слоя покрытия на мостовых сооружениях с применением некоррозионно-активного антигололедного реагента // *Дороги и мосты*. 2009. № 2 (22). С. 151–159.
1. Grinevich S.V., Lysenko V.E. Technology for installing an anti-icing layer on bridge structures using a non-corrosive anti-icing reagent. *Dorogi i mosty*. 2009. No. 2 (22), pp. 151–159. (In Russian).
2. Кондаков Д.Ф., Фролова Е.А., Кудряшова О.С., Данилов В.П. Противогололедные реагенты на основе хлоридов натрия и кальция и формиата натрия // *Химическая технология*. 2020. Т. 21. № 7. С. 297–300.
2. Kondakov D.F., Frolova E.A., Kudryashova O.S., Danilov V.P. Anti-icing reagents based on sodium and calcium chlorides and sodium formate. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2020. Vol. 21. No. 7, pp. 297–300. (In Russian).
3. Ачкеева М.В., Романюк Н.В., Авдюшкина Л.И., Фролова Е.А., Кондаков Д.Ф., Данилов В.П., Хомяков Д.М., Быков А.В. Противогололедные реагенты на основе ацетатов и хлоридов магния и натрия // *Химическая технология*. 2013. Т. 14. № 4. С. 193–198.
3. Achkeeva M.V., Romanyuk N.V., Avdyushkina L.I., Frolova E.A., Kondakov D.F., Danilov V.P., Khomyakov D.M., Bykov A.V. Anti-icing reagents based on magnesium and sodium acetates and chlorides. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2013. Vol. 14. No. 4, pp. 193–198. (In Russian).
4. Титова Т.С., Сацук Т.П., Терехин И.А., Тарабин И.В. Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей // *Электротехника*. 2021. № 2. С. 7–11.
4. Titova T.S., Satsuk T.P., Terekhin I.A., Tarabin I.V. Assessment of electrical safety conditions when using contact network supports as natural grounding conductors. *Elektrotekhnika*. 2021. No. 2, pp. 7–11. (In Russian).
5. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. 288 с.
5. Samchenko S.V. Formirovaniye i genezis struktury tsementnogo kamnya [Formation and genesis of the structure of cement stone]. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering. 2020. 288 p.
6. Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Урханова А.А., Лхасаранов С.А., Ардашова Г.Р., Федюк Р.С., Свинцов А.П., Иванов И.А. Механические и электрические свойства бетона, модифицированного углеродными наночастицами // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 8 (92). С. 163–172. DOI: 10.18720/MCE.92.1
6. Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasaranov S.A., Ardashova G.R., Fedyuk R.S., Svintsov A.P., Ivanov I.A. Mechanical and electrical properties of concrete modified with carbon nanoparticles. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No. 8 (92), pp. 163–172. DOI: 10.18720/MCE.92.1
7. Яковлев Г.И., Черни В., Пудов И.А., Полянских И.С., Саидова З.С., Бегунова Е.В., Семёнова С.Н. Свойства цементных матриц с повышенной электропроводностью // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 11–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-11-20
7. Yakovlev G.I., Cherni V., Pudov I.A., Polyanskikh I.S., Saidova Z.S., Begunova E.V., Semyonova S.N. Properties of cement matrices with increased electrical conductivity. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 1–2, pp. 11–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-11-20
8. Лопанов А.Н., Семейкин А.Ю., Фанина Е.А. Реология электропроводящих цементных паст и дисперсий графита // *Цемент и его применение*. 2009. № 5. С. 110–112.
8. Loranov A.N., Semeikin A.Yu., Fanina E.A. Rheology of electrically conductive cement pastes and graphite dispersions. *Tsement i yego primeneniye*. 2009. No. 5, pp. 110–112. (In Russian).
9. Ларсен О.А., Бахрах А.М. Изменение удельного электрического сопротивления токопроводящего бетона в процессе твердения // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-10-14>

9. Larsen O.A., Bahrah A.M. Change in the specific electrical resistance of conductive concrete during the hardening process. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 10–14. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-10-14>
10. Gao D., Sturm M., Mo Y.L., Electrical resistance of carbon-nanofiber concrete. *Smart material construction*. 2011. No. 20, pp. 101–112. DOI: 10.1088/0964-1726/18/9/095039
11. Wu J., Liu J., Yang F., Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 75, pp. 129–135 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004>
12. Ilhwan Y., Doo-Yeol Y., Soonho K., Electrical and self-sensing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with carbon nanotubes. *Sensors*. 2017. Vol. 17 (11). 2481. <https://doi.org/10.3390/s17112481>
13. Galao O., Banon L., Carmona J., Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing. *Materials*. 2016. Vol. 9 (4). 281. <https://doi.org/10.3390/ma9040281>
14. Gomis J., Galao O., Gomis V., Zornoza P., Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 75, pp. 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.042>
15. Sircar A.K., Lamond T.G. Effect of carbon-black particle-size distribution on electrical-conductivity. *Rubber Chemistry and Technology*. 1978. Vol. 51 (1), pp. 126–132. <https://doi.org/10.5254/1.3535720>
16. Voet A., Cook F.R. Investigation of carbon chains in rubber vulcanizates by means of dynamic electrical conductivity. *Rubber Chemistry and Technology*. 1968. Vol. 41 (5), pp. 1207–1214. <https://doi.org/10.5254/1.3539186>
17. Boonstra B.B., Dannenberg E.M. Performance of carbon blacks. Influence of surface roughness and porosity. *Rubber Chemistry and Technology*. 1955. Vol. 28 (3), pp. 878–890. <https://doi.org/10.5254/1.3542849>
18. Medalia A.I. Electrical conduction in carbon black composites. *Rubber Chemistry and Technology*. 1986. Vol. 59 (3), pp. 432–454. <https://doi.org/10.5254/1.3538209>
19. Verhelst W.F. et al. The role of morphology and structure of carbon blacks in the electrical conductance of vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*. 1977. Vol. 50 (4), pp. 735–746. <https://doi.org/10.5254/1.3535171>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Учебное пособие «Химическая технология керамики»

Авторы – Андрианов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В., Власов А.С.,
Гузман И.Я., Лукин Е.С., Мосин Ю.М., Скидан Б.С.

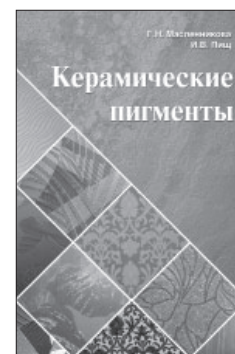
Освещены вопросы современного состояния технологии основных видов керамических изделий строительного, хозяйственно-бытового и технического назначения, а также различных видов огнеупоров. Главное внимание уделено основным процессам технологии керамики и ее свойствам. Подробно изложены характеристика различных видов сырья, проблемы подготовки керамических масс различного вида и их формование различными методами, особенности механизмов спекания, а также дополнительные виды обработки керамики: металлизация, глазурование, декорирование, механическая обработка. Детально описаны свойства керамических изделий – механические, деформационные, теплофизические, электрофизические, в том числе при высоких температурах.



Книга «Керамические пигменты»

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

В монографии рассмотрены физико-химические основы синтеза пигментов, в том числе термодинамическое обоснование реакций, теория цветности, современные методы синтеза пигментов и их классификация, методы оценки качества. Приведены сведения по технологии пигментов и красок различных цветов и кристаллических структур. Описаны современные методы декорирования керамическими красками изделий из сортового стекла, фарфора, фаянса и майолики. Книга предназначена для научных сотрудников, студентов, специализирующихся в области технологии керамики и стекла, а также для инженерно-технических работников, занятых в производстве керамических изделий и красок.



**Заказать литературу можно через редакцию
по тел.: (499) 390-87-17; e-mail: mail@rifsm.ru,
или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru**

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 строительства инженерных сооружений на структурно-неустойчивых склонах

Возведение и реконструкция зданий и сооружений на проблемных инженерно-геологических и пересеченных территориях с наличием оврагов, неустойчивых склонов является актуальной задачей современного геотехнического строительства. Она еще усугубляется наличием в основаниях проектируемых объектов перемежающихся инженерно-геологических элементов с пониженными значениями физико-механических характеристик. Зачастую встречаются линзы, выклинивания слоев слабых грунтов с неустойчивыми физико-механическими свойствами. В статье рассмотрен случай возведения фундаментов с использованием буроинъекционных свай ЭРТ и монолитных железобетонных ростверков под смонтированный напорный трубопровод диаметром 1020 мм.

Ключевые слова: удерживающие заглубленные конструкции, геотехническое строительство, электроразрядная технология ЭРТ, буроинъекционная свая ЭРТ, железобетонный ростверк.

Для цитирования: Соколов Н.С., Соколов С.Н., Соколов А.Н. Геотехническая технология строительства инженерных сооружений на структурно-неустойчивых склонах // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 52–55.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-52-55>

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 Avenue, Cheboksary, 428015, Chuvash Republic, Russian Federation)

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

Geotechnical Technology for the Construction of Engineering Structures on Structurally Unstable Slopes

The construction and reconstruction of buildings and structures on problematic engineering-geological and rugged territories with the presence of ravines, unstable slopes is an urgent task of modern geotechnical construction. It is further aggravated by the presence in the foundations of the designed objects of intermittent engineering-geological elements with reduced values of physical and mechanical characteristics. Often there are lenses, wedging out layers of soft soils with unstable physical and mechanical properties. The article considers the case of the construction of foundations using drill-injection piles EDT and monolithic reinforced concrete grillages for a mounted pressure pipeline with a diameter of 1020 mm.

Keywords: retaining buried structures, geotechnical construction, electric discharge technology EDT, drilled injection pile EDT, reinforced concrete grillage.

For citation: Sokolov N.S., Sokolov S.N., Sokolov A.N. Geotechnical technology for the construction of engineering structures on structurally unstable slopes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 52–55. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-52-55>

Строительство инженерных сооружений на неустойчивых сильно пересеченных склонах представляет собой сложную инженерную и геотехническую проблему. В связи с этим возникают сложности, связанные с обеспечением прочности оснований [1–7], а также необходимости геотехнических расчетов устойчивости заглубленных строительных конструкций [8–12]. Необходимо отметить, что основополагающими нормативными документами в геотехническом строительстве являются своды правил СП 22.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* «Основания зданий и сооружений» и СП 24.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП «Свайные фундаменты». Неукоснительное осуществление требований, изложенных в них, должно являться принципиальным для геотехников и строителей, осуществляющих подобные работы.

Ниже рассматривается один из случаев из геотехнической практики строительства напорных водоводов высокого давления на структурно-неустойчивом склоне.

Проектируемый водовод начинается от юго-западного угла дома № 22, к. 1 по ул. Короленко в

Чебоксарах и протягивается в северо-западном направлении через долину овражно-балочной сети р. Сугутки до угла дома № 25а по ул. Набережной.

В геоморфологическом отношении участок работ расположен в долине овражно-балочной сети р. Сугутка. Абсолютные отметки поверхности изменяются от 76.8–81.0 м в пределах поймы и до 91.0–97.8 м на бровке бортов склонов овражно-балочной сети.

Долина овражно-балочной сети на участке работ имеет корытообразную форму общей шириной 230–240 м с четко выраженной поймой и его уступом по правому склону. Левый борт овражно-балочной сети высотой ~15–18 м, крутизной 24°.

Бровка правого борта овражно-балочной сети сложена техногенными неоднородными грунтами до глубины 8,5 м и в приборочной части представлена уступом. Крутизна склона на данном участке 27°, высотой 18–20 м. В настоящее время склон залесен низкоствольными деревьями и кустарником. Пойма на данном участке четко выраженная, с шириной ~100 м, подтапливаемая в весенний период.

Наблюдается водоток от искусственного пруда, расположенного на правой надпойменной террасе в сторону р. Сугутки.

Инженерно-геологический разрез на исследуемой площадке до глубины бурения 20 м в ходе выполнения буровых работ и лабораторных исследований сложен (сверху вниз): голоценовыми делювиальными (d_{Qh}), плейстоценовыми лессовыми отложениями (p_{rQp}) проблематичного генезиса, аллювиальными (a_{Qp}), пролювиально-делювиальными (d_{pQp}) отложениями, подстилаемыми верхнепермскими отложениями (P_{3s+v}). Сверху данные отложения перекрыты техногенными грунтами (t_{Qh}).

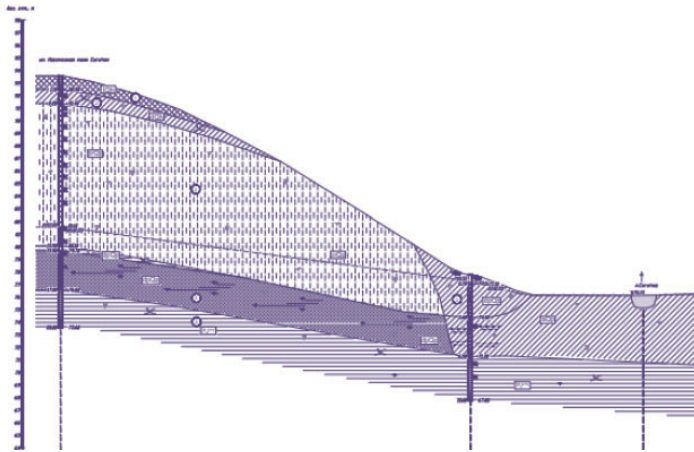


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез
Fig. 1. Engineering-geological section

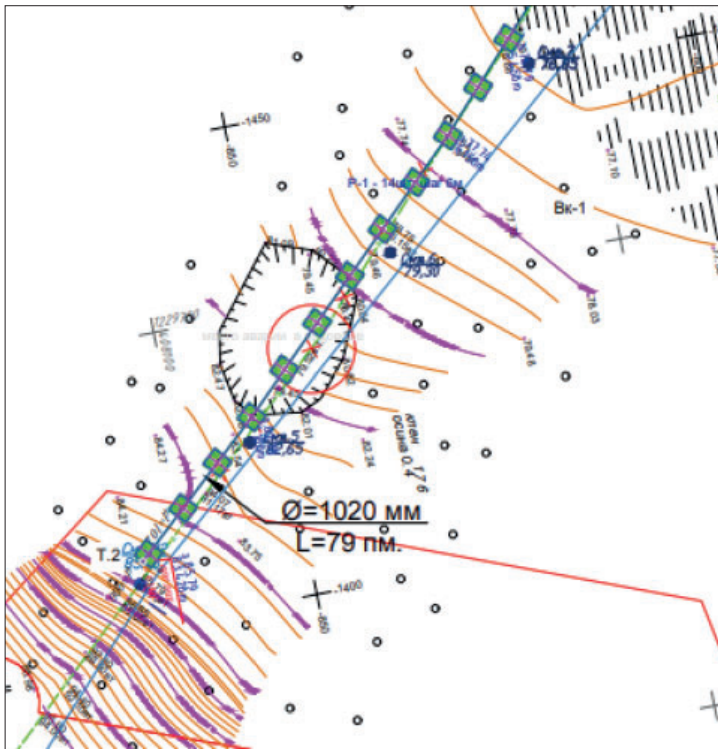


Рис. 2. План монолитных железобетонных ростверков под напорный трубопровод $d=1020$ мм
Fig. 2. Plan of monolithic reinforced concrete grillages under the pressure pipeline $d=1020$ mm

На участке строительства объекта с дневной поверхностью в пределах бровки овражно-балочной сети и уступа залегают техногенные отложения, представленные суглинками коричневыми, темно-коричневыми, от полутвердой до тугопластичной консистенции, с включением мелкого строительного и бытового мусора (щебень, бетон, бой кирпича, арматура, полиэтиленовые пленки и т. д.) с погребенным почвенно-растительным слоем. Возраст насыпи более пяти лет. Общая мощность техногенных грунтов составляет от 0,6 м в тальвеге овражно-балочной сети до 8,5 м на бровке правого склона.

Плейстоценовые делювиальные (d_{Qh}) и лессовые отложения (p_{rQp}) проблематичного генезиса вскрыты в западной части участка работ, на бровке левого склона. Представлены суглинками легкими пылеватыми, коричневыми, светло-коричневыми, полутвердой консистенции, точечно-гумусированными, с остатками корней растительности, трещиноватыми, железненными, с белыми известковыми стяжениями, пористыми. Вскрыты отложения на глубине 1,1 м (абс. отм. 92.5 м) мощностью 12.4 м.

Плейстоценовые пролювиально-делювиальные (d_{pQp}) отложения на участке работ представлены: 1. Суглинками коричневыми, темно-коричневыми, красновато-коричневыми, от тугопластичной до мягкопластичной консистенции, гумусированными, железненными, опесчаненными, с включением корней растительных остатков, с гнездами известковистости. 2. Песками коричневыми, табачно-коричневыми, мелкими, железненными, глинистыми, от влажных до водонасыщенных, с включением алевритов. Вскрыты на глубине 3,5–13,9 м (абс. отм. 79.7–89.3 м), мощностью 1,5–8,8 м.

Примечания:

1. Плейстоценовые аллювиальные отложения вскрыты в пойменной части долины р. Сугутки и представлены суглинками серыми, темно-серыми, от мягкопластичной до текучепластичной консистенции, гумусированными, с остатками корней растительности, железненными. Вскрыты с поверхности и до глубины 3,4 м, мощностью 3,1–8,2 м.

2. Верхнепермские отложения (P_{3s+v}) представлены глинами коричневато-красными, красными, с тонкими прослоями и гнездами алевритов и песков, с включением известковистости, железненные по трещинам. Вскрыты терригенные коренные отложения на глубине 5–17,3 м (абс. отм. 69.65–80.5 м), мощностью от 2,7 м до 6,3 м.

Условия залегания литологических разновидностей грунтов представлены на инженерно-геологическом разрезе, а послойное описание грунтов приведено в геолого-литологических колонках.

На основании проведенных полевых и лабораторных исследований в соответствии с существующими нормативными документами на площадке строительства выделены шесть инженерно-геологических элементов (рис. 1): ИГЭ № 1. Суглинки легкие пылеватые, полутвердые (t_{QIV}). ИГЭ № 2. Суглинки легкие пылеватые, полутвердые, слабopросадочные ($d_{Qh} + p_{rQp}$). ИГЭ № 3. Суглинки легкие пылеватые, тугомягкопластичные (d_{pQp}). ИГЭ № 4. Пески мелкие, влажные – водонасыщенные, средней плотности (d_{pQp}). ИГЭ № 5. Суглинки легкие песчанистые, текучемягкопластичные (a_{Qp}). ИГЭ № 6. Глины легкие пылеватые, полутвердые – твердые (P_{3s+v}).

На период проведенных инженерно-геологических изысканий на рассматриваемом участке работ до глубины бурения 20 м вскрыты безнапорные грунтовые воды. В пойменной части долины р. Сугутки (абс. отм. 76.8 м) уровень подземных вод установился на поверхности земли и на глубине 12–14 м в прирвочной части (абс. отм. 81.6–83.8 м). Установившийся уровень подземных вод зафиксирован в аллювиальных (ИГЭ № 5) и пролювиально-делювиальных отложениях (ИГЭ № 3, 4).

Питание горизонта подземных вод осуществляется преимущественно в весенне-летний и осенний периоды путем инфильтрации талых вод и атмосферных осадков в тальвеге овражно-балочной сети, а также будет осуществляться за счет утечек из водонесущих коммуникаций. Подземный фильтрационный поток направлен в сторону овражно-балочной сети долины р. Сугутки, где и происходит разгрузка.

При возведении напорного водовода высокого давления рекомендовано выполнение мероприятий по регулированию поверхностного стока в сторону р. Сугутки для предотвращения образования промоин – эрозии неустойчивого склона. Эти мероприятия особенно необходимы в связи с выявленными обстоятельствами, что по результатам выполненных инженерно-геологических изысканий геологические и инженерно-геологические процессы, влияющие на условия строительства, выражены в виде просадочности лессовых суглинков ИГЭ № 2, вскрытых в западной части участка работ, на бровке левого склона; коэффициент относительной просадочности ε_{sl} при замачивании под нагрузкой $P=0,2$ МПа составляет $\varepsilon_{sl}=0,113$, начальное просадочное давление $P_{sl}=0,005$ МПа, тип грунтовых условий по просадочности первый. Мощность просадочной толщи составляет $H_{sl}=9,8$ м. Данные грунты при замачивании резко теряют свои прочностные и деформационные характеристики. При динамических нагрузках у данных грунтов также могут проявиться тиксотропные свойства.

Опасные геологические процессы на исследованном участке возможны в виде оползня

грунтов и промоин в связи с неоднородностью сложения инженерно-геологического разреза с включениями просадочных грунтов правого склона, а также техногенных грунтов, и из-за неорганизованного сброса поверхностного стока по склону в сторону овражно-балочной сети. Также учтены разработанные геотехнические мероприятия, предотвращающие возможное замачивание лессовых грунтов при техногенном подтоплении вследствие нарушений условий стока поверхностных вод и утечек из водонесущих коммуникаций.

На рис. 2 приводится схема устройства фундаментов под напорный трубопровод диаметром $d=1020$ мм. При этом труба смонтирована методом прокола. Устройство фундаментов производится уже под выло-

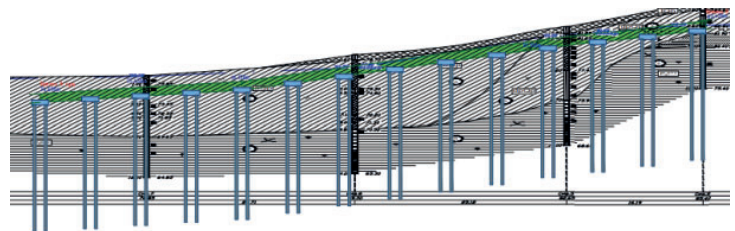


Рис. 3. Вертикальная привязка буринъекционных свай ЭРТ и монолитных железобетонных ростверков под напорный трубопровод $d=1020$ мм
Fig. 3. Vertical connection of ERT drilled injection piles and monolithic reinforced concrete grillages under the pressure pipeline $d=1020$ mm

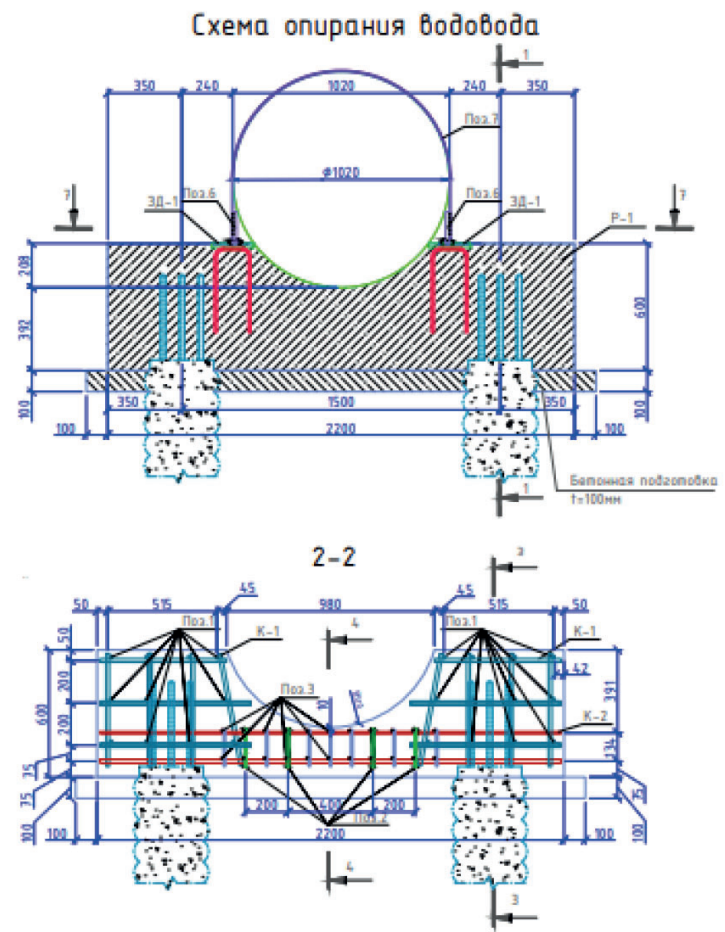


Рис. 4. Узел передачи нагрузки от напорного трубопровода $d=1020$ мм на монолитный железобетонный ростверк
Fig. 4. Load transfer unit from pressure pipeline $d=1020$ mm to monolithic reinforced concrete grillage

женную трубу в нижеприведенной последовательно-сти (рис. 3 и 4) методом сверху вниз. В качестве заглу-бленных железобетонных конструкций гармонич-но подходят буроинъекционные сваи [8, 10, 12–14] из-готавливаемые по электроразрядной технологии, – сваи ЭРТ и возводимые по обеим сторонам трубы. По оголовкам свай ЭРТ уже устраиваются монолитные железобетонные ростверки, одновременно вовлекая возведенный фундамент с инженерным сооружением.

Список литературы / References

1. Тер-Мартirosян А.З., Кивлюк В.П., Исаев И.О., Шишкина В.В. Анализ расчетных предпосылок геотехнического прогноза нового строительства на окружающую застройку // *Жилищное строи-тельство*. 2022. № 9. С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-57-66>
1. Ter-Martirosian A.Z., Kivluik V.P., Isaev I.O., Shishkina V.V. Analysis of the calculated prerequisites for the geotechnical forecast of new construction on the sur-rounding buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2022. No. 9, pp. 57–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-57-66>
2. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния под-земного строительства. М.: АСВ, 2017. 168 с.
2. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Ekhnologicheskies osadki zdaniy i sooruzhenii v zone vliyaniya podzemno-go stroitel'stva [Technological precipitation of build-ings and structures in the zone of influence of under-ground construction]. Moscow: ASV. 2017. 168 p.
3. Ilichev V.A., Kononov P.A., Nikiforova N.S., Bulgakov L.A. Deformations of the retaining struc-tures upon deep excavations in Moscow. *Proc. Of Fifth Int. Conf on Case Histories in Geotechnical Engineering*. April 3–17. New York, 2004, pp. 5–24.
4. Sokolov N., Ezhov S., Ezhova S. Preserving the natural landscape on the construction site for sustainable ecosys-tem. *Journal of applied engineering science*. 2017. Vol. 15. No. 4, pp. 518–523. DOI:10.5937/jaes15-14719
5. Nikiforova N.S., Vnukov D.A. Geotechnical cut-off diaphragms for built-up area protection in urban un-derground development. *The pros, of the 7th Int. Symp. «Geotechnical aspects of underground construction in soft ground»*. May 16–18, 2011. tc28 IS Roma, AGI, 2011, № 157NIK.
6. Nikiforova N.S., Vnukov D.A. The use of cut off of different types as a protection measure for existing buildings at the nearby underground pipelines installa-tion. *Proc. of Int. Geotech. Conf. dedicated to the Year of Russia in Kazakhstan*. Almaty, Kazakhstan, September 23–25, 2004, pp. 338–342.
7. Petrukhin V.P., Shuljatjev O.A., Mozgacheva O.A. Effect of geotechnical work on settlement of surround-ing buildings at underground construction. *Proceedings of the 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Prague. 2003.
8. Соколов Н.С. Технологические приемы устрой-ства буроинъекционных свай с многоместными уширениями // *Жилищное строительство*. 2016. № 10. С. 54–57.
8. Sokolov N.S. Technological methods of installation of bored-injection piles with multiple enlargements. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2016. No. 10, pp. 54–57. (In Russian).
9. Соколов Н.С. Технология увеличения несущей способности основания // *Строительные матери-алы*. 2019. № 6. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-67-71>
9. Sokolov N.S. Technology of increasing a base bearing capacity. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 6, pp. 67–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-67-71>
10. Соколов Н.С., Соколов А.Н., Соколов С.Н., Глушков В.Е., Глушков А.В. Расчет буроинъекцион-ных свай ЭРТ повышенной несущей способности // *Жилищное строительство*. 2017. № 11. С. 20–25.
10. Sokolov N.S., Sokolov A.N., Sokolov S.N., Glushkov V.E., Glushkov A.V. Calculation of flight augering piles of high bearing capacity. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 11, pp. 20–25. (In Russian).
11. Соколов Н.С., Соколов С.Н., Соколов А.Н. Опыт восстановления здания Введенского кафедраль-ного собора в городе Чебоксары // *Геотехника*. 2016. № 1. С. 60–65.
11. Sokolov N.S., Sokolov S.N., Sokolov A.N. The experience of restoring the building of the Vvedensky Cathedral in Cheboksary. *Geotechnica*. 2016. No. 1, pp. 60–65. (In Russian).
12. Никонорова И.В., Соколов Н.С. Строительство и территориальное освоение оползнеопасных скло-нов Чебоксарского водохранилища // *Жилищное строительство*. 2017. № 9. С. 13–19.
12. Nikonorova I.V., Sokolov N.S. Construction and terri-torial development of landslide slopes of the Cheboksary water reservoir. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 9, pp. 13–19. (In Russian).
13. Соколов Н.С., Соколов С.Н., Соколов А.Н. Технология устройства монолитного железобе-тонного ростверка в стесненных условиях функ-ционирующего объекта // *Строительные матери-алы*. 2023. № 7. С. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-12-16>
13. Sokolov N.S., Sokolov S.N., Sokolov A.N. Technology for the installation of a monolithic reinforced concrete grillage in cramped conditions of a functioning facility. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 12–16. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-12-16>
14. Соколов Н.С., Соколов С.Н., Соколов А.Н. Практи-ка строительства в особо стесненных условиях // *Жилищное строительство*. 2023. № 9. С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-9-41-47>
14. Sokolov N.S., Sokolov S.N., Sokolov A.N. The practice of construction in particularly cramped conditions. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 9, pp. 41–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-9-41-47>

УДК 666.914

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-56-62>

С.В. САМЧЕНКО, д-р техн. наук (samchenko@list.ru),
М.Г. БРУЯКО, канд. техн. наук (mbruyako@yandex.ru),
А.М. ЕРГЕНЯН, соискатель (adan-89@mail.ru),
В.А. ШВЕЦОВА, инженер, зав. лабораторией (wishhuma@mail.ru)

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

Строительный композит на основе гипсового вяжущего и гидрофобизированного борщевика Сосновского

В рамках представленного исследования были получены гипсовые композиты различной плотности и прочности. Изучено влияние различных гидрофобизаторов на коэффициент размягчения гипсового композита, дисперсно-армированного растительным наполнителем. В качестве растительного наполнителя использовался измельченный стебель борщевика Сосновского. Растительный наполнитель был предварительно высушен, обработан кремнийорганическими гидрофобизаторами методом орошения с последующим опудриванием гипсовым вяжущим. Из полученной массы были изготовлены образцы-балочки 4×4×16 см. Давление прессования варьировалось от 0,2 до 0,8 МПа. Для полученных образцов были определены плотность, прочность при изгибе, при сжатии и коэффициент размягчения. Увеличение давления прессования повышает плотность и прочностные характеристики гипсового композита. Модификация растительного наполнителя не оказала влияния на плотность и прочность композита, но позволила в 1,3–2,3 раза повысить его водостойкость.

Ключевые слова: борщевик Сосновского, возобновляемое сырье, малоэтажное строительство, арболитовые блоки, ресурсосберегающие технологии, гипсовое вяжущее, модифицированный гипсовый композит.

Для цитирования: Самченко С.В., Бруяко М.Г., Ергенян А.М., Швецова В.А. Строительный композит на основе гипсового вяжущего и гидрофобизированного борщевика Сосновского // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 56–62.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-56-62>

S.V. SAMCHENKO, Doctor of Sciences (Engineering) (samchenko@list.ru), M.G. BRUYAKO, Candidate of Sciences (Engineering), A.M. ERGENYAN, postgraduate student (adan-89@mail.ru), V.A. SHVETSOVA, Engineer, Head of Laboratory (wishhuma@mail.ru) National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl'skoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Building Composite Based on Gypsum Binder and Sosnovsky's Hogweed

Within the framework of this paper, gypsum composites of different densities and strengths were obtained. The influence of different hydrophobizers on the softening coefficient of gypsum composite reinforced with plant filler was investigated. The crushed stem of Sosnovsky's hogweed was used as a plant filler. The plant filler was pre-dried, treated with organosilicon hydrophobizers by irrigation method followed by powdering with gypsum binder. From the obtained mass, 4×4×16 cm specimens were fabricated. The pressing pressure was varied from 0.2 to 0.8 MPa. The density, flexural strength, compressive strength, and softening coefficient were determined for the obtained specimens. Increasing the pressing pressure increases the density and strength characteristics of the gypsum composite. Modification of the plant filler did not affect the density and strength of the composite but allowed 1.3–2.3 times to increase its water resistance.

Keywords: Sosnovsky's hogweed, renewable raw materials, low-rise building, woodcrete blocks, resource-saving technologies, gypsum binder, modified gypsum composite.

For citation: Samchenko S.V., Bruyako M.G., Ergenyan A.M., Shvetsova V.A. Building composite based on gypsum binder and hydrofobized Sosnovsky's hogweed. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 56–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-56-62>

В 2022 г. Правительством РФ была запущена программа, подразумевающая сниженную процентную ставку по ипотеке для индивидуального жилого домостроения (<https://xn--h1alcedd.xn--d1aqf.xn--p1ai/news/dom-rf-v-rossii-zarabotala-programma-1gotnoj-ipoteki-na-izhs/>). Согласно условиям льготной сельской ипотеки дом может быть построен из любых строительных материалов, но за один строительный сезон. По этой причине актуальным является строительство домов в 1–3 этажа из блочных материалов, например из ячеистого бетона, керамзитобетона, арболита. Использование блоков позволяет возвести здание за 3–4 месяца и уложиться в установленные сроки.

Первое производство арболитовых блоков было запущено в Швейцарии в 1938 г. (<https://katlovan.ru/>

[chno-takoe/chno-takoe-arbolitovuj-blok.html](https://katlovan.ru/chno-takoe/chno-takoe-arbolitovuj-blok.html)). В состав арболитовых блоков входит вяжущее (цемент), древесная щепа, добавки-минерализаторы, например хлористый кальций, и вода. В настоящее время древесную щепу стараются заменить доступными и легковозобновляемыми побочными продуктами переработки сельскохозяйственных растений и древесины – конопляной кострой и древесными опилками. Полученные кстробетонные и опилкобетонные блоки имеют сравнительно высокие эксплуатационные и прочностные характеристики [1–4]. Существенным недостатком является высокая цена аналогов арболита.

Для армирования цементной матрицы может быть использована щепа из борщевика Сосновского. С 2015 г. борщевик Сосновского удален из реестра сельскохозяйственных культур и отнесен к сорным

растениям (https://antiborschevik.info/status_law). Борщевик Сосновского (*Heracleum Sosnowskyi* Manden) – один из трех видов борщевиков гигантского размера. Это выносливые растения, хорошо произрастающие в холодном климате. Он быстро распространяется при помощи корневой системы и спор, находящихся на его верхушках. По этой причине большие площади территорий бывшего СССР поражены борщевиком. По имеющимся данным, больше всего заражены борщевиком Дмитровский, Клинский и Можайский районы Московской области – заняты от 1,7 до 2,1 тыс. га земель. В десятке самых неблагоприятных по борщевiku муниципалитетов значатся Мытищи, Руза, Волоколамский, Солнечногорский и Сергиево-Посадский районы, а также Шаховская и Талдом (Карты распространения борщевика Сосновского и зачем мы сделали свою. URL: <https://habr.com/ru/post/574324/>). Площадь распространения борщевика ежегодно увеличивается на 10%, только на европейской части России им занято более 1000 тыс. га [5].

Щепа из борщевика может быть получена из ствола растения путем его сушки, а затем дробления. В процессе производства щепы из корневой системы и листьев борщевика могут быть получены сахар, биоэтанол, целлюлоза [6–9]. Из зеленой биомассы могут быть выделены металлы и фоточувствительные

вещества – фуранокумарины, которые активно используются в медицине и фармакологии [10–12].

Как было упомянуто ранее, в состав арболитовых блоков обязательно вводятся добавки-минерализаторы. Эти добавки необходимы для нейтрализации веществ, входящих в состав растительных наполнителей – сахаров, лигнина и др. Эти вещества под действием капиллярного подсоса мигрируют в тело цементного камня, разрушая его и снижая прочность древесно-армированного цементного композита. В щепе борщевика содержится целлюлозы столько же, сколько и в щепе сосны (45–46% против 47%), тогда как лигнина содержится меньше (21–25% против 27,5%) [13].

В качестве вяжущего вещества для арболитовых блоков могут быть использованы портландцемент, гипсовое или известковое вяжущее [14–16]. Портландцементное вяжущее получило широкое распространение благодаря высоким прочностным характеристикам материалов, изготовленных на его основе, приобретаемых после затвердевания. К его недостаткам относятся длительный набор прочности, высокие усадочные деформации, необходимость соблюдения строгих условий окружающей среды для достижения требуемых характеристик. Известковое вяжущее широко распространены на Западе из-за особенностей климата, жаркого и сухого. Твердение известковых композитов является длительным, так как в ходе химической реакции свободная известь поглощает углекислый газ из воздуха, карбонизируясь и приобретая требуемую прочность. Гипсовое вяжущее обладает быстрыми сроками схватывания и твердения, однако его существенным недостатком является низкий коэффициент размягчения.

Для повышения водостойкости гипсового камня могут быть использованы различные гидрофобизаторы. Наиболее эффективным является придание водоотталкивающих свойств всему объему изделия, а не только его поверхностным слоям. В качестве гидрофобизаторов используются жирные соли металлов, которые вводятся в сухую смесь компонентов в порошкообразном виде [17–20]. Механизм действия таких гидрофобизаторов основан на уплотнении структуры материала и закупоривании капилляров водоотталкивающими частицами.

Многие кремнийорганические жидкости являются хорошими гидрофобизаторами. Они могут быть представлены в виде водорастворимых жидкостей (Пента-811) или водонерастворимых эмульсий (Пента-814). Механизм действия кремнийорганиче-

Таблица 1
Table 1

Используемые стандарты и определяемые характеристики
Using standards and defined characteristics

Определяемая характеристика	Стандарт
Гипсовое вяжущее	
Степень помола	ГОСТ 125–2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия»
Нормальная густота	
Сроки схватывания	
Предел прочности при изгибе через 2 ч, МПа	
Предел прочности при сжатии через 2 ч, МПа	
Растительный наполнитель	
Средняя плотность	ГОСТ 9758–2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний»
Насыпная плотность	
Водопоглощение	ГОСТ 9758–2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний»

Таблица 2
Table 2

Физико-механические характеристики гипсового вяжущего
Physical and mechanical characteristics of gypsum binder

Вяжущее	Остаток на сите 02, %	Нормальная густота, %	Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин	Предел прочности при сжатии 2 ч, МПа	Предел прочности при изгибе 2 ч, МПа
Гипсовое вяжущее Г-10	7,4	38	11	21,5	12,05	5,45

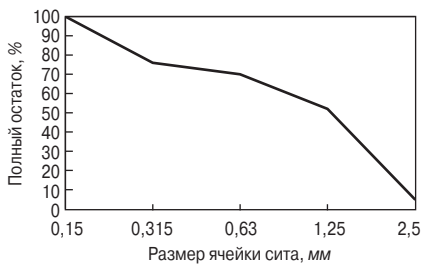


Рис. 1. Фракционный состав наполнителя, полученного из борщевого Сосновского
 Fig. 1. Particle size distribution of the filler obtained from Sosnovsky's hogweed

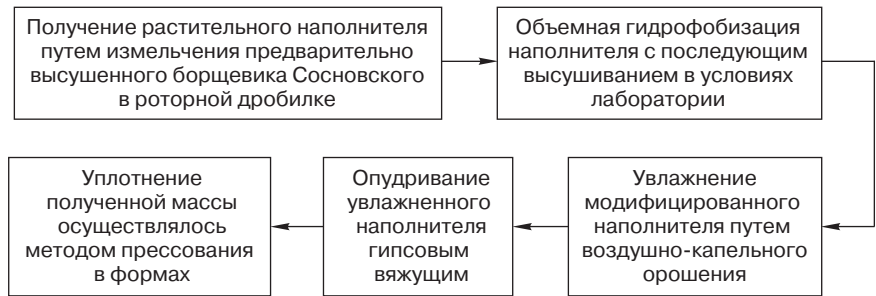


Рис. 2. Технологическая схема изготовления образцов гипсового композита
 Fig. 2. Technological scheme of gypsum composite samples manufacturing

ских гидрофобизаторов заключается в адсорбции силоксановых групп на гидрофильных капиллярах материала и их ориентации органическим радикалом наружу. Водоотталкивающая пленка при этом не препятствует парообмену материала с окружающей средой. В рамках данной работы для гидрофобизации растительного наполнителя было решено использовать кремнийорганический модификатор, выпускаемый в виде жидкости, так как он может равномернее распределяться по объему и поверхности наполнителя.

В рамках данной работы было исследовано влияние модифицированного растительного наполнителя на свойства гипсового композита.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных работ были использованы материалы:

- гипсовое вяжущее марки Г-10 от производителя Samara Gips;
- растительный наполнитель (борщевик Сосновского);
- гидрофобизирующие добавки;
- вода водопроводная.

Для гипсового вяжущего были определены следующие характеристики в соответствии со стандартами, приведенными в табл. 1.

Полученные характеристики приведены в табл. 2, 3.

По результатам проведенных испытаний гипсовое вяжущее соответствует марке Г-10 Б II ГОСТ 125–2018.

Растительный наполнитель был измельчен при помощи ножевой роторной мельницы РМ. На рис. 1 представлена гранулометрическая кривая полученного наполнителя.

Для измельченного растительного наполнителя были определены характеристики, представленные в табл. 3.

В качестве добавок-гидрофобизаторов были выбраны кремнийорганические жидкости различных производителей: Аквасил (кремнийорганическая жидкость), Пента-811 (водный раствор метилсиликоната калия), Пента-814 (водный раствор органо-гидридсилоксана) и Sika-1. Для изготовления образцов была использована вода, соответствующая ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Исследования проводились на образцах-балочках 4×4×16 см. Образцы изготавливались методом опудривания измельченного растительного наполнителя с последующим увлажнением и прессованием. Схема изготовления образцов представлена на рис. 2. Готовые образцы-балочки подвергались сушке в сушильном шкафу при t=50°C до постоянной массы.

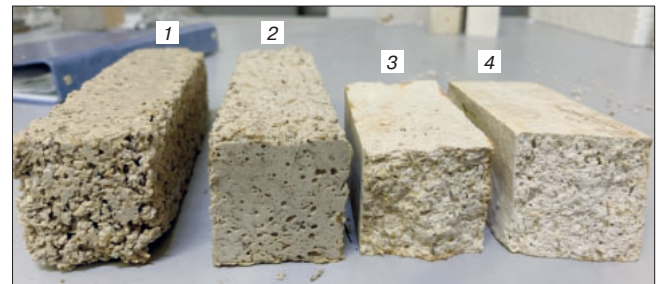


Рис. 3. Полученные образцы плотностью: 1 – 400 кг/м³; 2 – 500 кг/м³; 3 – 600 кг/м³; 4 – 700 кг/м³
 Fig. 3. Average density of samples of gypsum composites: 1 – 400 kg/m³; 2 – 500 kg/m³; 3 – 600 kg/m³; 4 – 700 kg/m³

Таблица 3
 Table 3

**Физические свойства растительного наполнителя
 Physical properties of plant filler**

Основные характеристики	Значения
Средняя плотность, кг/м³	115–125
Насыпная плотность, кг/м³	90–95
Водопоглощение (неизмельченного образца), %	160–190
Водопоглощение (измельченного образца), %	290–320

Таблица 4
 Table 4

**Зависимость прочностных показателей от плотности композита и соотношения Б/Г
 Dependence of strength parameters on composite density and H/G ratio**

Плотность, кг/м³	Б/Г	R _{изг} , МПа	R _{сж} , МПа
400	2	0,4	1,2
500	1	0,57	1,41
600	0,5	0,68	1,51
700	0,3	0,9	1,68

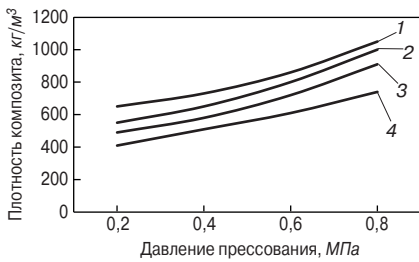


Рис. 4. Зависимость плотности материала от давления прессования: 1 – Б/Г=0,3; 2 – Б/Г=0,5; 3 – Б/Г=1; 4 – Б/Г=2
Fig. 4. Dependence of average density of gypsum composite on compression pressure: 1 – H/G=0,3; 2 – H/G=0,5; 3 – H/G=1; 4 – H/G=2

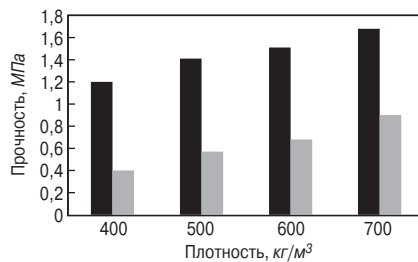


Рис. 5. Изменение прочностных показателей в зависимости от плотности, МПа: ■ – предел прочности при сжатии; □ – предел прочности при изгибе
Fig. 5. Variation of strength parameters of gypsum composite depending on density, МПа: ■ – compressive strength; □ – bending strength

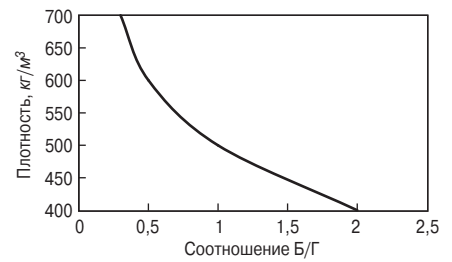


Рис. 6. Изменение плотности материала в зависимости от соотношения Б/Г
Fig. 6. Variation of density of gypsum composite depending on H/G ratio

Эксперименты были выполнены в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ.

Результаты исследования

Было исследовано влияние соотношения борщевик–гипс (Б/Г) и давления прессования на плотность и прочность гипсового композита. Полученные образцы представлены на рис. 3.

При повышении давления прессования и снижении соотношения Б/Г композит обладает более высокой плотностью и прочностью при сжатии и при изгибе (табл. 4, рис. 4).

С увеличением плотности прочность композита при изгибе и при сжатии возрастает практически линейно (рис. 5).

Плотность материала снижается с увеличением содержания растительного наполнителя (рис. 6).

Для оценки эффективности гидрофобизирующих добавок для изготовленных образцов-балочек 4×4×16 см был определен коэффициент размягчения. Полученные результаты приведены на рис. 7.

При введении 2% гидрофобизатора Пента-811 коэффициент размягчения гипсового композита увеличился в 1,5–2 раза; Пента-814 – в 1,3–1,9 раза;

Аквасил – в 1,6–2,1 раза; Sika-1 – в 1,4–2 раза в зависимости от давления прессования. При введении 4% гидрофобизатора Пента-811 коэффициент размягчения гипсового композита увеличился в 1,6–2,1 раза; Пента-814 – в 1,4–2 раза; Аквасил – в 1,7–2,3 раза; Sika-1 – в 1,5–2,1 раза в зависимости от давления прессования.

По результатам предыдущих испытаний было установлено, что наибольшие значения коэффициента размягчения могут быть достигнуты при применении кремнийорганического гидрофобизатора Аквасил. Поэтому далее были изготовлены гипсовые композиты с гидрофобизированным Аквасилом растительным наполнителем; в качестве воды затворения для изготовления органоминерального композита по технологической схеме, приведенной на рис. 2, также используется гидрофобизатор Аквасил. Гидрофобизатор вводился в воду в количествах 1–6%. Для полученных образцов были определены коэффициенты размягчения (рис. 8).

При введении гидрофобизатора Аквасил свыше 4% коэффициент размягчения композита $K_p > 0,8$, следовательно, такой материал является водостойким.

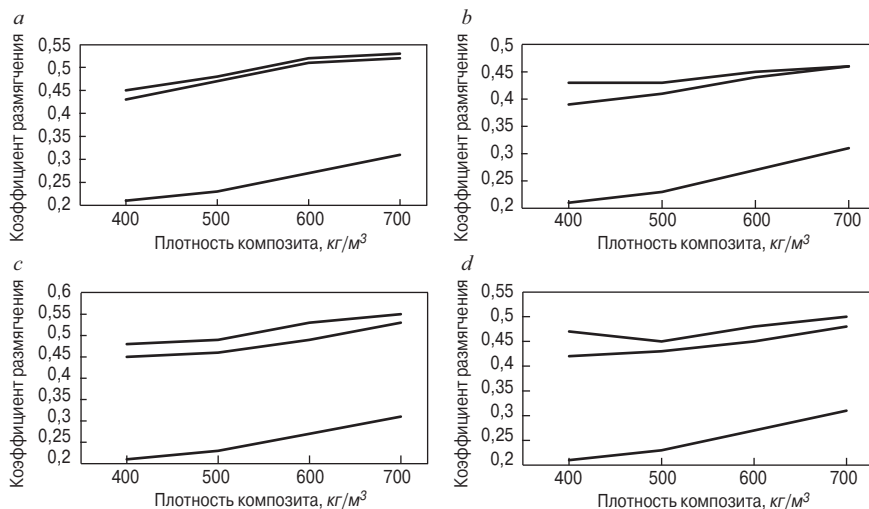


Рис. 7. Зависимость коэффициента размягчения от содержания гидрофобизатора: а – Пента-811; б – Пента-814; с – Аквасил; д – Sika-1; 1 – K_p при С=0%; 2 – K_p при С=2%; 3 – K_p при С=4%
Fig. 7. Dependence of softening coefficient on hydrophobizer content: а – Penta-811; б – Penta-814; с – Aquasil; д – Sika-1; 1 – K_p at C=0%; 2 – K_p at C=2%; 3 – K_p at C=4%

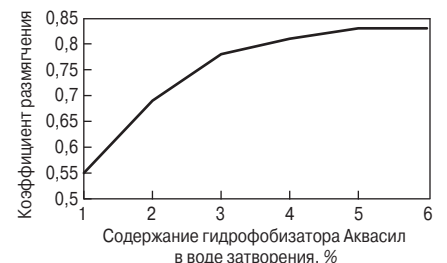


Рис. 8. Зависимость коэффициента размягчения от содержания гидрофобизатора Аквасил
Fig. 8. Dependence of softening coefficient on hydrophobizer Aquasil content

Обсуждение

Борщевик – крупное растение высотой больше 1 м, реже достигает 3 м. Стебель бороздчато-ребристый, шероховатый, полый внутри. Листья обычно желтовато-зеленого цвета длиной 1,4–1,9 м. Корневая система стержневая, основная масса располагается в слое до 30 см, отдельные корни достигают глубины 2 м. Урожайность дикорастущего борщевика 50 т/га, а культивируемого – 250 т/га. Борщевик способен расти в суровых климатических условиях. С 2015 г. Правительством РФ борщевик отнесен к сорным растениям. Высокая урожайность, большое количество запасов борщевика, большой выход зеленой массы с гектара делают борщевик привлекательным для использования в строительном материаловедении.

Высушенный борщевик Сосновского легко поддается измельчению, так как имеет полый стебель. В измельченном виде борщевик обладает высокой гигроскопичностью (водопоглощение по объему составляет 290–320%), что позволяет сделать его носителем водорастворимого модификатора. В данной работе в качестве модифицирующей добавки были использованы кремнийорганические жидкости различных составов. Гидрофобизаторы Пента-811, Аквасил и Sika-1 являются водорастворимыми. После воздушно-капельного орошения борщевика гидрофобизирующими жидкостями и последующего высушивания массовая доля гидрофобизатора в растительном наполнителе составила 28,1–30,7 мас. %. Состав Пента-814 относится к водонерастворимым жидкостям. По этой причине адгезия на границе «гипсовый камень – измельченный борщевик» оказалась несколько хуже, чем при добавлении водорастворимых гидрофобизаторов, что привело к снижению прочности и коэффициента размягчения гипсового композита. Коэффициент размягчения

гипсового композита повышается при увеличении давления прессования. Максимальное значение коэффициента размягчения было достигнуто при использовании гидрофобизатора Аквасил в количестве 4 мас. % и составило 59% при давлении прессования 0,8 МПа, что в 1,7 раз выше, чем у негидрофобизированного образца. Объемная гидрофобизация наиболее эффективна для композита плотностью 400 кг/м³, так как позволяет увеличить коэффициент размягчения в 2,3 раза. При добавлении гидрофобизатора Аквасил в количестве 4% и более коэффициент размягчения композита $K_p > 0,8$, следовательно, такой материал является водостойким.

Варьирование давления прессования от 0,2 до 0,8 МПа позволяет получать композиты различной плотности и назначения. В соответствии с ГОСТ 25820–2014 «Бетоны легкие. Технические условия» образцы плотностью 400–450 кг/м³ и прочностью при сжатии 1,2–1,29 МПа относятся к теплоизоляционным изделиям, образцы плотностью 500–800 кг/м³ и прочностью при сжатии 1,41–1,68 МПа – к конструкционно-теплоизоляционным.

Выводы

Борщевик Сосновского обладает большим потенциалом использования в сфере строительного материаловедения. Растительный наполнитель, полученный из борщевика, может быть использован в качестве армирующего компонента для изготовления теплоизоляционных или конструкционно-теплоизоляционных изделий. Объемная модификация наполнителя кремнийорганическими жидкостями позволяет получать гипсовый композит повышенной водостойкости, изделия из которого могут быть использованы не только внутри, но и снаружи зданий.

Список литературы

1. Смирнова О.Е., Пичугин А.П., Хританков В.Ф. Композиционные материалы на основе органического сырья с наноразмерными добавками // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-76-81>
2. Федосов С.В., Лapidус А.А., Соколов А.М., Саркисов Д.А., Самир Фараун, Исаченко С.Л. Показатели технологии изготовления изделий из арболита с применением электротепловой обработки // *Строительные материалы*. 2023. № 3. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-4-10>
3. Цепaeв В.А., Панюжев Е.М. Состав и прочность опилкобетона на низкомарочном гипсовом вяжущем // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2003. № 2 (530). С. 55–58.
4. Цепaeв В.А., Лебедев М.А. О предельном уровне напряжения сжатия в кладке из опилкобетона // *Жилищное строительство*. 2008. № 9. С. 8–10.

References

1. Smirnova O.E., Pichugin A.P., Khritankov V.F. Composite materials based on organic raw materials with nanosized additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 76–81. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-76-81>
2. Fedosov S.V., Lapidus A.A., Sokolov A.M., Sarkisov D.A., Samir Faraun, Isachenko S.L. Indicators of the technology of manufacturing products from arbolite using electric heat treatment. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 3, pp. 4–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-4-10>
3. Tsepaev V.A., Panyuzhev E.M. Composition and strength of sawdust concrete with low-quality gypsum binder. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2003. No. 2 (530), pp. 55–58. (In Russian).
4. Tsepaev V.A., Lebedev M.A. On the maximum level of compressive stress in sawdust concrete masonry

5. Рыжиков Д.М. Контроль зон произрастания борщевика Сосновского по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 221 с.
6. Вураско А.В., Агеев М.А., Сиваков В.П. Получение и свойства технической целлюлозы из борщевика окислительно-органо-сольвентным способом // *Химия растительного сырья*. 2022. № 1. С. 289–298. DOI: 10.14258/jcprm.20220110121
7. Патент РФ № 2458106. МПК C10L 1/02 (2006.01), C07C 31/08 (2006.01). *Биоэтанол из борщевика как дикорастущего, так и культивируемого* / Стребков Д.С., Доржиев С.С., Базарова Е.Г., Патева И.Б.; заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии. № 2010138695/04. Заявл. 21.09.2010. Оpubл. 10.08.2012. Бюл. № 22.
8. Патент РФ № 2761239. МПК D21C 5/00 (2006.01), D21C 3/04 (2006.01), D21C 1/04 (2006.01), C08B 37/00 (2006.01), (52) СПК D21C 5/00 (2021.08), D21C 1/04 (2021.08), D21C 3/04 (2021.08), C08B 37/00 (2021.08). *Способ получения целлюлозы* / Токбаева А.А., Баракова М.Б., Добринов А.В., Романов В.А., Пронин А.С.; заявитель и патентообладатель Университет ИТМО. № 2021117882. Заявл. 21.06.2021. Оpubл. 06.12.2021. Бюл. № 34.
9. Патент РФ № 2458148. МПК C13B 50/00 (2011.01). *Способ получения белого сахара из борщевика* / Стребков Д.С., Доржиев С.С., Базарова Е.Г., Патева И.Б.; заявитель и патентообладатель ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии. № 2010138696/13. Заявл. 21.09.2021. Оpubл. 10.08.2012. Бюл. № 22.
10. Патент РФ № 2618281. МПК B09C 1/02 (2006.01), A01B 79/02 (2006.01), C22B 11/00. *Способ извлечения металлов из почвы с использованием биомассы растений* / Чертов В.В.; заявитель и патентообладатель Чертов В.В. № 2015153812. Заявл. 16.12.2015. Оpubл. 03.05.2017. Бюл. № 13.
11. Патент РФ № 2588271. МПК B03D 1/02 (2006.01), B03D 1/004 (2006.01), B03D 103/02 (2006.01), B03D 101/06 (2006.01). *Способ флотационного разделения сульфидных минералов с использованием растительного модификатора* / Иванова Т.А., Чантурия В.А., Матвеева Т.Н. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИПКОН РАН. № 2015116125/03. Заявл. 28.04.2015, Оpubл. 27.06.2016. Бюл. № 18.
12. Патент РФ № 2676612. МПК C09K 17/52 (2006.01), (52) СПК C09K 17/52 (2018.05). *Полимерсодержащий состав покрытия* / Давыденко Н.В. Заявитель и патентообладатель Давыденко Н.В. № 2018112874. Заявл. 10.04.2018. Оpubл. 09.01.2019. Бюл. № 1.
13. Барбаш В.А., Трембус И.В., Оксентюк Н.Н. Бумага и картон из стеблей кенафа и сорго сахарного // *Химия растительного сырья*. 2014. № 4. С. 271–278. DOI: 10.14258/jcprm.201404214
14. СН 549-82. Инструкции по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита. М.: Госстрой СССР, 1983. 46 с.
- Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2008. No. 9, pp. 8–10. (In Russian).
- Ryzhikov D.M. Monitoring the growth zones of Sosnovsky's hogweed by the spectral characteristics of reflected waves in the optical range. Diss... Candidate of Sciences (Engineering). Saint Petersburg. 2019. 221 p. (In Russian).
- Vurasko A.V., Ageev M.A., Sivakov V.P. Preparation and properties of technical cellulose from hogweed by the oxidative-organosolv method. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2022. No. 1, pp. 289–298. DOI: 10.14258/jcprm.20220110121
- Patent RF No. 2458106. IPC C10L 1/02 (2006.01), C07C 31/08 (2006.01). *Bioetanol iz borshchevika kak dikorastushchego, tak i kul'tiviruyemogo* [Bioethanol from hogweed, both wild and cultivated]. Strebkov D.S., Dorzhiev S.S., Bazarova E.G., Pateeva I.B. Application 09/21/2010; Publ. 08/10/2012. Bull. No. 22. (In Russian).
- Patent RF No. 2761239. IPC D21C 5/00 (2006.01), D21C 3/04 (2006.01), D21C 1/04 (2006.01), C08B 37/00 (2006.01), (52) SPK D21C 5/00 (2021.08), D21C 1/04 (2021.08), D21C 3/04 (2021.08), C08B 37/00 (2021.08). *Sposob polucheniya tsellyulozy* [Method for producing cellulose]. Tokbaeva A.A., Barakova M.B., Dobrinov A.V., Romanov V.A., Pronin A.S. Application 06/21/2021; Publ. 06.12.2021. Bull. No. 34. (In Russian).
- Patent RF No. 2458148. IPC C13B 50/00 (2011.01). *Sposob polucheniya belogo sakhara iz borshchevika* [Method for producing white sugar from hogweed]. Strebkov D.S., Dorzhiev S.S., Bazarova E.G., Pateeva I.B. Application 09.21.2021; Publ. 08/10/2012. Bull. No. 22. (In Russian).
- Patent RF No. 2618281. IPC B09C 1/02 (2006.01), A01B 79/02 (2006.01), C22B 11/00. *Sposob izvlecheniya metallov iz pochvy s ispol'zovaniem biomassy rastenii* [Method for extracting metals from soil using plant biomass]. Chertov V.V. Application 12/16/2015; Publ. 05/03/2017. Bull. No. 13. (In Russian).
- Patent RF No. 2588271. IPC B03D 1/02 (2006.01), B03D 1/004 (2006.01), B03D 103/02 (2006.01), B03D 101/06 (2006.01). *Sposob flotatsionnogo razdeleniya sul'fidnykh mineralov s ispol'zovaniyem rastitel'nogo modifikatora* [Method of flotation separation of sulfide minerals using a plant modifier]. Ivanova T.A., Chanturia V.A., Matveeva T.N. and etc. Application 04/28/2015; Publ. 06/27/2016. Bull. No. 18.
- Patent RF No. 2676612. IPC C09K 17/52 (2006.01), (52) SPK C09K 17/52 (2018.05). *Polimersoderzhashchiy sostav pokrytiya* [Polymer-containing coating composition]. Davydenko N.V. Application 04/10/2018; Publ. 01/09/2019. Bull. No. 1.
- Barbash V.A., Trembus I.V., Oksentyuk N.N. Paper and cardboard from kenaf and sweet sorghum stems. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2014. No. 4, pp. 271–278. DOI: 10.14258/jcprm.201404214
- SN 549-82. Instruksii po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i primeneniyu konstruksiy i izdeliy iz arbolita.

15. Мусорина Т.А., Наумова Е.А., Шонина Е.В., Петриченко М.Р., Куколев М.И. Теплотехнические свойства энергоэффективного материала на основе растительной добавки (сухой борщевик) // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 12. С. 1555–1571. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1555-1571
16. Delhommea F., Hajimohammadi A., Almeida A., Jiang C., Moreau D., Gan Y., Wang X., Castel A. Physical properties of Australian hurd used as aggregate for hemp concrete. *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 24. 100986. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100986>
17. Соловьев В.Г., Швецова В.А. Исследование свойств бетона с использованием стеарата кальция $\text{Ca}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 28. № 1. С. 20–26.
18. Потапова Е.Н., Исаева И.В. Повышение водостойкости гипсового вяжущего // *Строительные материалы*. 2012. № 7. С. 20–22.
19. Никитина О.В., Аниканова Л.А., Кудяков А.И., Дизендорф Т.Е., Т. Садик Кызы. Эффективные пропитки для гипсосодержащих строительных материалов // *Вестник Томского государственного строительного университета*. 2014. № 3. С. 154–160.
20. Морозова Н.Н., Майсурадзе Н.В., Клоков В.В. Исследование гидрофобизации гипсовых и композиционно-гипсовых материалов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. Т. 20. № 16. С. 34–37.
- [SN 549-82. Instructions for the design, manufacture and use of structures and products made of wood concrete]. Moscow: Gosstroy USSR. 1983. 46 p.
15. Musorina T.A., Naumova E.A., Shonina E.V., Petrichenko M.R., Kukolev M.I. Thermal properties of energy-efficient material based on plant additives (dry hogweed). *Vestnik of MSUCE*. 2019. Vol. 14. Iss. 12, pp. 1555–1571. (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1555-1571
16. Delhommea F., Hajimohammadi A., Almeida A., Jiang C., Moreau D., Gan Y., Wang X., Castel A. Physical properties of Australian hurd used as aggregate for hemp concrete. *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 24. 100986. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100986>
17. Solovyov V.G., Shvetsova V.A. Study of the properties of concrete using calcium stearate $\text{Ca}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2021. Vol. 28. No. 1, pp. 20–26. (In Russian).
18. Potapova E.N., Isaeva I.V. Increase in water resistance of gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 20–22. (In Russian).
19. Nikitina O.V., Anikanova L.A., Kudiyakov A.I., Diesendorf T.E., T. Sadyk Kyzy. Effective impregnations for gypsum-containing building materials. *Vestnik of the Tomsk State University of Construction and Technology*. 2014. No. 3, pp. 154–160. (In Russian).
20. Morozova N.N., Maisuradze N.V., Klokov V.V. Study of hydrophobization of gypsum and composite-gypsum materials. *Vestnik of the Kazan Technological University*. 2017. Vol. 20. No. 16, pp. 34–37. (In Russian).



21–27 января 2024 г.

IX Всероссийская научно-практическая конференция «Инженерное дело на Дальнем Востоке России»



ДАЛЬНИИС

Дальневосточный
федеральный университет

Тематика конференции:

- Строительные конструкции, здания и сооружения;
- Основания и фундаменты, подземные сооружения;
- Теплоснабжение и вентиляция;
- Водоснабжение и канализация;
- Строительные материалы и изделия;
- Гидротехническое строительство;
- Технология и организация строительства;
- Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей;
- Строительная механика;
- Экологическая безопасность строительства.

Условия участия:

- участие в конференции бесплатно;
- состав экспертов конкурса формируется оргкомитетом мероприятия;
- соответствие тезисов требованиям к оформлению (предоставление текстов докладов до 21.01.2024);
- презентация проекта в формате PowerPoint (*.ppt);
- время доклада – 10 мин.

Вопросы по организации

Федюк Роман Сергеевич, д.т.н., доц., профессор ВУЦ при ДФУ
+7(950) 281-79-45; roman44@yandex.ru

ТАНГ ВАН ЛАМ¹, канд. техн. наук, преподаватель-исследователь (tangvanlam@humg.edu.vn),
 ФАМ ДЫК ЛЬОНГ¹, магистр (luong100x@gmail.com);
 НГУЕН БА БИНЬ², магистр (babinhconinco3c@gmail.com);
 Б.И. БУЛГАКОВ³, канд. техн. наук, доцент (BulgakovBI@mgsu.ru),
 С.И. БАЖЕНОВА³, канд. техн. наук, доцент (BazhenovaS.I.@mgsu.ru)

¹ Ханойский горно-геологический университет (18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиём, Ханой, Вьетнам)

² Акционерное общество «Конинко3с» (Нхан Чинь, Тхань Суан, Ханой, Вьетнам)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, Москва, Ярославское ш., д. 26)

Газобетоны на геополимерном вяжущем из техногенных отходов

Газобетон – материал, широко используемый во Вьетнаме благодаря ряду преимуществ по сравнению с тяжелым бетоном. В работе представлены некоторые результаты экспериментальных исследований свойств газобетонов, полученных с использованием геополимерного вяжущего из техногенных отходов, образующихся в больших количествах во Вьетнаме. Использованные сырьевые материалы включали золу-уноса ТЭС, доменный шлак, керамический порошок, алюминиевую пудру и активирующий щелочной раствор, состоящий из водных растворов гидроксида и метасиликата натрия. Испытания образцов из газобетонов разработанных составов проводили в соответствии с действующими российскими и вьетнамскими стандартами. Экспериментальные результаты подтвердили возможность получения газобетонов на геополимерном вяжущем на основе многотоннажных техногенных отходов, обладающих средней плотностью в сухом состоянии менее 1600 кг/м³ и прочностью при сжатии в возрасте твердения 28 сут 18,8–27,9 МПа. При этом наибольшую прочность показал газобетон, содержащий 0,456 кг/м³ алюминиевой пудры и 50 мас. % доменного шлака в составе геополимерного связующего при соотношении активирующего щелочного раствора и активных минеральных добавок, равном 0,4.

Ключевые слова: газобетон, алюминиевая пудра, крупнотоннажные техногенные отходы, зола-уноса, доменный шлак, керамический порошок, активирующий щелочной раствор.

Для цитирования: Танг Ван Лам, Фам Дык Лыонг, Нгуен Ба Бинь, Булгаков Б.И., Баженова С.И. Газобетоны на геополимерном вяжущем из техногенных отходов // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 63–69.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-63-69>

TANG VAN LAM¹, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer-Researcher (tangvanlam@humg.edu.vn),
 PHAM DUC LUONG¹, Master (luong100x@gmail.com); NGUYEN BA BINH², Master (babinhconinco3c@gmail.com);
 B.I. BULGAKOV³, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor (BulgakovBI@mgsu.ru),
 S.I. BAZHENOVA³, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor. (BazhenovaSI@mgsu.ru)

¹ Hanoi University of Mining and Geology (18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam)

² Joint Stock Company "Coninco3c" (Nhan Chinh, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam)

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Aerated Concrete with Geopolymer Binder from Technogenic Waste

Aerated concrete is a material widely used in Vietnam due to several advantages over heavy concrete. This article presents some results of experimental studies of the properties of aerated concrete produced using geopolymer binder from industrial waste generated in large quantities in Vietnam. The raw materials used included thermal power plant fly ash, blast furnace slag, ceramic powder, aluminum powder and an activating alkaline solution consisting of aqueous solutions of sodium hydroxide and sodium metasilicate. Testing of aerated concrete samples of the developed compositions was carried out in accordance with current Russian and Vietnamese standards. Experimental results confirmed the possibility of producing aerated concrete with a geopolymer binder based on large-tonnage technogenic waste, with an average dry density of less than 1600 kg/m³ and a compressive strength at the age of hardening of 28 days of 18.8–27.9 MPa. At the same time, aerated concrete containing 0.456 kg/m³ of aluminum powder and 50% wt. showed the greatest strength. blast furnace slag in the composition of the geopolymer binder, with a ratio of activating alkaline solution and active mineral additives equal to 0.4.

Keywords: aerated concrete, aluminum powder, large-scale industrial waste, fly ash, blast furnace slag, ceramic powder, activating alkaline solution.

For citation: Tang Van Lam, Pham Duc Luong, Nguyen Ba Binh, Bulgakov B.I., Bazhenova S.I. Aerated concrete with geopolymer binder from technogenic waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 63–69. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-63-69>

Главным недостатком традиционных тяжелых цементных бетонов является большая масса изготавливаемых из них изделий и конструкций, требующая сооружения массивных фундаментов [1–3]. Поэтому производством легких бетонов на основе портландцемента стало популярным во всем мире, включая Вьетнам. Такие бетоны используются для изготовления как несущих [4, 5], так и теплоизоля-

ционных конструкций различных зданий и сооружений [6, 7].

Согласно исследованиям [8–10], изделия и конструкции из легких бетонов на портландцементе обладают такими преимуществами, как меньшая толщина и более низкая масса, что устраняет необходимость сооружения массивных фундаментов, позволяет уменьшить материалоемкость и снизить стоимость

строительства, а также хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства.

В последние годы во многих странах мира с целью снижения потребности в портландцементе особое внимание уделяется исследованию и производству высокопрочных легких бесцементных бетонов на активированных щелочных вяжущих [11–13].

Газобетоны представляют собой легкий бетон с пористой структурой, получаемый путем отверждения сырьевых смесей, состоящих из связующего, газообразователя, тонкодисперсных наполнителей и мелких заполнителей различного происхождения и воды [14, 15]. В строительстве они используются для самых разных целей: изготовления каркасов, полов и стен многоэтажных домов, тонких и изогнутых пластин, предварительно напряженных железобетонных конструкций, утепления стен, потолков и кровли.

Рациональное применение легких и особо легких газобетонов в строительных работах дает большие экономические и технические преимущества: экономия сырья, уменьшение потерь тепла, улучшение микроклимата в жилых и рабочих помещениях. Кроме того, легкий бетон – перспективный материал для сооружений на слабых грунтах и общая стоимость высотных зданий с использованием легкого бетона значительно ниже, чем других видов бетона, несмотря на его более высокую удельную стоимость [16].

Во всем мире исследования свойств и областей использования легких бетонов развивались в разных направлениях. Многие исследования посвящены получению пенобетонов и газобетонов автоклавного твердения на основе цементных вяжущих с использованием активных минеральных добавок [17]. Эти исследования демонстрируют возможность изготовления высокопрочного легкого бетона, пригодного для применения при строительстве высотных зданий во Вьетнаме. Однако такой бетон требует сложного процесса пропаривания для получения изделий большой прочности. Также проводились исследования получения легких бетонов из цементного вяжущего и пустотелого заполнителя, или пенополистирола. В результате были получены легкие

бетоны со средней плотностью в сухом состоянии менее 2000 кг/м^3 и средней прочностью при сжатии $5\text{--}15 \text{ МПа}$ [8, 9].

Во Вьетнаме проведен ряд исследований с целью использования геополлимерных вяжущих для изготовления безобжигового кирпича и легких бетонов [14–16]. В результате этих исследований было получено и изучено геополлимерное связующее, состоящее из шлама глиноземного производства и золы-уноса ТЭС в сочетании с активирующим щелочным раствором. Результаты исследования [18] показывают, что легкие бетоны, полученные с использованием активирующего раствора щелочи и пористых гранул, имеют среднюю плотность менее 1300 кг/м^3 и среднее значение прочности при сжатии порядка 5 МПа . Однако прочность при сжатии бетона, полученного в данном исследовании, все еще достаточно низкая и не соответствует требуемой прочности несущей кирпичной стены класса A_1 , равной $7,5 \text{ МПа}$ [7].

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований свойств разработанных газобетонов на основе геополлимерного вяжущего, состоящего из золы-уноса, доменного шлама и керамического порошка «ГОТО», полученного с использованием алюминиевой пудры и активирующего щелочного раствора. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность получения газобетонов со средней плотностью в сухом состоянии менее 1600 кг/м^3 и прочностью при сжатии на 28-е сут твердения $18,8\text{--}27,9 \text{ МПа}$.

Используемые материалы

Для получения газобетона были использованы следующие сырьевые материалы.

Алюминиевая пудра (АП) использована в качестве газообразователя, поризующего бетонную смесь и вызывающего увеличение ее объема. Применялась также пудра вьетнамского производства с чистотой 90%, размером частиц $50\text{--}75 \text{ мкм}$, истинной плотностью $2,65 \text{ г/м}^3$ и насыпной плотностью 1560 кг/м^3 (рис. 1), которая вступала в химическую реакцию с гидроксидом натрия активирующего щелочного раствора с выделением водорода [15–18]:

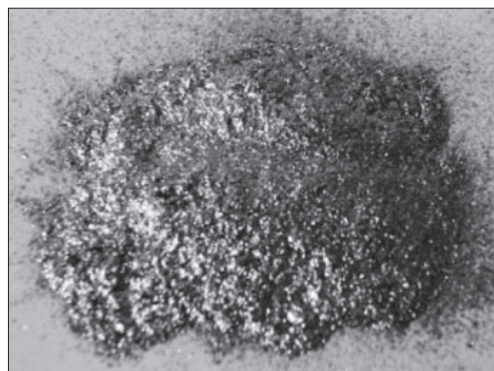
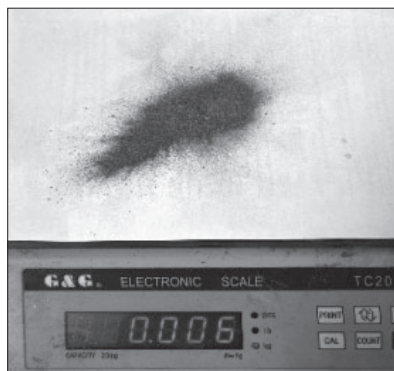
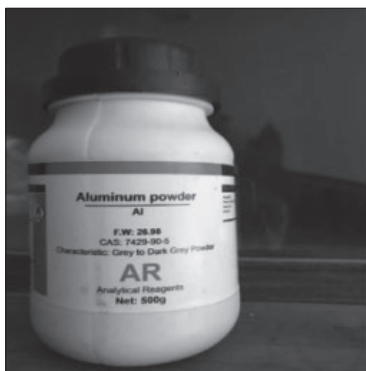


Рис. 1. Алюминиевая пудра
Fig. 1. Aluminum powder

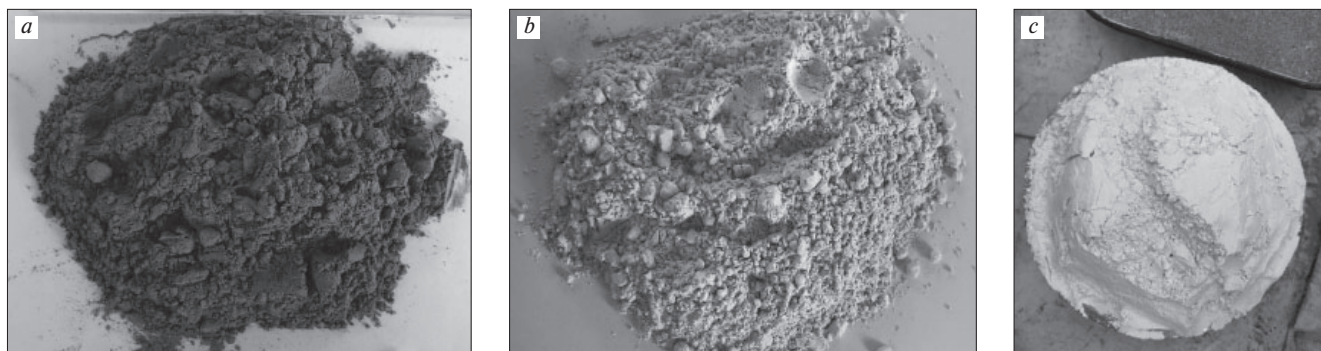
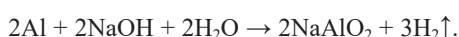


Рис. 2. Зола-уноса ТЭС «Вунг Анг» (а); доменный шлак металлургического завода «Хоа Фат» (b) и керамический порошок «ТОТО» (с)
 Fig. 2. Fly ash from the Vung Ang thermal power plant (a), blast furnace slag from the Hoa Phat metallurgical plant (b) and TOTO ceramic powder (c)



Коэффициент газообразования пудры составлял 1050 л водорода на 1 кг.

Активные минеральные добавки (МДО) для получения геополимерного вяжущего включали многотоннажные техногенные отходы промышленных предприятий Вьетнама в виде золы-уноса тепловой электростанции «Вунг Анг», тонкомолотого доменного шлака металлургического завода «Хоа Фат» и порошкообразного отхода производства сантехнических керамических изделий завода «ТОТО» (рис. 2).

Низкокальциевая зола-уноса ТЭС «Вунг Анг» (ЗУ) класса F соответствовала требованиям ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия». Ее влажность составляла 1,15%.

В процессе производства сантехнических керамических изделий, таких как умывальники, ванны и унитазы, на заводе «ТОТО» (Донг Ань – Ханой) ежемесячно образуется около 2000 т твердых отходов, в основном в виде брака, загрязняющих окружающую среду. Для борьбы с этим негативным явлением бракованные изделия подвергают дроблению, в результате чего получают керамический порошок «ТОТО» (КП) с размером частиц 0,1–0,5 мм.

Химический состав и физические свойства использованных активных минеральных добавок приведены в табл. 1.

Активирующий щелочной раствор (АР) (рис. 3 и 4) состоял из водных растворов гидроксида (NaOH) и метасиликата натрия (Na₂SiO₃) плотностью соответственно 1,45±0,01 г/см³ и 1,55±0,01 г/см³ в соотношении Na₂SiO₃/NaOH=2,5 [11, 12]; его процентный состав по массе: NaOH=12%; Na₂SiO₃=30% и H₂O=58%.

Для снижения водопотребности газобетонной смеси использовали поликарбоксилатный суперпластификатор SR 5000F (SR5000) производства фирмы «Silk Road» (Вьетнам) с плотностью 1,1 г/см³ при температуре 20±5°C. Это суперпластификатор типа G, который соответствует требованиям вьетнамского стандарта TCVN 8826:2011.

Вода (В), использованная для приготовления активирующего щелочного раствора, соответствовала требованиям ГОСТ 23732–2011 и TCVN 4506:2012 и имела рН=7,5.

Определение соотношения компонентов газобетонной смеси

Как известно, плотность и прочность являются важными свойствами газобетона.

В настоящем исследовании соотношения компонентов газобетонной смеси, позволяющие получить газобетон, обладающий требуемыми плотностью и прочностью, были определены в соответствии со стандартом ACI 211.4R-2008 [19], с использованием метода абсолютных объемов по формулам [20–22]:

Таблица 1
 Table 1

Химический состав и физические свойства золы-уноса, доменного шлака и керамического порошка «ТОТО»
 Chemical composition and physical properties of fly ash, blast furnace slag and TOTO ceramic powder

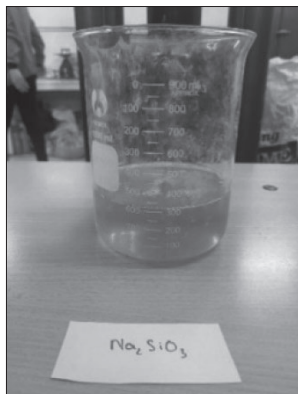
Показатель	Зола-уноса «Вунг Анг»	Тонкомолотый доменный шлак «Хоа Фат»	Керамический порошок «ТОТО»
Химический состав, мас. %			
SiO ₂	54,2	36,3	64,5
Al ₂ O ₃	23,3	12,6	19,5
Fe ₂ O ₃	9,8	3,4	4,35
SO ₃	2,5	5,7	0,11
K ₂ O	1,5	0,4	2,16
Na ₂ O	1,6	0,3	0,73
CaO	1,2	40,1	5,31
P ₂ O ₅	1,4	–	0,17
Потери при прокаливании	4,5	1,2	3,17
Физические свойства			
Удельная поверхность, см ² /г	2850	3600	1580
Истинная плотность, г/см ³	2,35	2,92	2,13
Насыпная плотность, кг/м ³	1575	1550	1620



Рис. 3. Гидроксид натрия
Fig. 3. Sodium hydroxide



Рис. 4. Раствор метасиликата натрия
Fig. 4. Sodium metasilicate solution



$$D_{\text{газобетона}} = 3У + ДШ + КП + NaOH + Na_2SiO_3 + SR5000; \quad (1)$$

$$V_{\text{газа}} = K_{\text{ки}} \cdot \left[1000 - \left(\frac{3У}{\rho_{3У}} + \frac{ДШ}{\rho_{ДШ}} + \frac{КП}{\rho_{КП}} + \frac{NaOH}{\rho_{NaOH}} + \frac{Na_2SiO_3}{\rho_{Na_2SiO_3}} + \frac{SR5000}{\rho_{SR5000}} \right) \right], \quad (2)$$

где $D_{\text{газобетона}}$ – расчетная плотность образцов пенобетона во влажном состоянии, кг/м³; 3У, ДШ, КП, NaOH, Na₂SiO₃, SR5000 – расходы соответственно золы-уноса, доменного шлака, керамического порошка, водных растворов гидроксида и метасиликата натрия и суперпластификатора, кг; $\rho_{3У}$, $\rho_{ДШ}$, $\rho_{КП}$, ρ_{NaOH} , $\rho_{Na_2SiO_3}$ и ρ_{SR5000} – соответственно истинные плотности золы-уноса, доменного шлака, керамического порошка, растворов гидроксида и метасиликата натрия и суперпластификатора, кг/м³; $V_{\text{газа}}$ – объем выделяющегося газа, м³; $K_{\text{ки}}$ – коэффициент остаточ-

Таблица 2
Table 2

Соотношение по массе сырьевых компонентов для получения газобетонов
Ratios by mass of raw materials for the production of aerated concrete

Соотношение	КП МДО	3У МДО	ДШ МДО	SR5000 МДО	AP МДО	Na ₂ SiO ₃ NaOH
Значение	20%	50% 40% 30%	30% 40% 50%	1%	0,4	2,5

ного газа; по данным исследований [16, 20, 21], $K_{\text{ки}}=1,1-1,3$ (принят $K_{\text{ки}}=1,2$ [7, 8, 21, 22]).

Методы исследований

Составы газобетонных смесей рассчитывали методом абсолютных объемов с последующей их корректировкой по результатам экспериментальных испытаний.

Среднюю влажность газобетонов в естественном состоянии в возрасте твердения 28 сут определяли в соответствии со стандартом TCVN 9030:2017.

Среднюю плотность газобетонов во влажном и сухом состоянии определяли в соответствии со стандартом TCVN 3115:1993.

Прочностные показатели при сжатии в возрасте твердения 7, 14 и 28 сут и на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут определяли по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» соответственно на образцах-кубах размером 150×150×150 мм и на образцах-призмах 100×100×400 мм с помощью универсальной испытательной установки «ADVANTEST 9».

Приготовление газобетонных смесей

Требовалось рассчитать составы сырьевых смесей, позволяющие получить газобетоны на геополимерном связующем, обладающие прочностью при сжатии в возрасте твердения 28 сут не ниже 18 МПа и средней плотностью во влажном состоянии порядка 1600 кг/м³.

Требуемую массу алюминиевой пудры ($m_{\text{АП}}$) рассчитывали по формуле [14, 15]:

$$m_{\text{АП}} = \frac{\text{объем выделяющегося газа, л}}{1050}, \text{ кг.} \quad (3)$$

Таблица 3
Table 3

Составы газобетонных смесей
The compositions of aerated concrete mixtures

№ состава	3У ДШ	Содержание сырьевых компонентов, кг/м ³							
		МДО	3У	ДШ	КП	SR5000	Раствор NaOH	Раствор Na ₂ SiO ₃	Алюминиевая пудра
1	50/30	1135	568	340	227	11,35	130	324	0,431
2	40/40	1135	454	454	227	11,35	130	324	0,433
3	30/50	1135	340	568	227	11,35	130	324	0,456



Рис. 5. Изготовление газобетонных образцов
Fig. 5. Production of aerated concrete samples

На основании вышеизложенного и используя предварительные экспериментальные результаты, были выбраны исходные соотношения сырьевых компонентов, которые приведены в табл. 2.

Полученные в результате проведенных расчетов составы трех газобетонных смесей представлены в табл. 3.

Газобетонные образцы выдерживали 1 сут в форме, по истечении которых извлекали, срезали излишки смеси и погружали в бак с водой до достижения возраста испытаний (рис. 5). Определение размеров образцов производилось посредством измерения линейкой; масса определялась взвешиванием на лабораторных весах. Прочность определяли на прессе, скорость нагружения составляла 500 Н/с.

Результаты

Полученные результаты испытаний образцов разработанных газобетонов на геополимерном вяжущем приведены в табл. 4.

Установлено, что у исследованных газобетонов на геополимерном связующем в возрасте твердения 28 сут показатели средней влажности в естественном состоянии, а также средней плотности во влажном и сухом состояниях находились в пределах соответственно 10,75–15,39 мас. %; 1602–1619 кг/м³ и 1540–1572 кг/м³ и в соответствии с TCVN 9029:2017 [23] разработанные газобетоны относятся к легким бетонам со средней плотностью от 500 до 1850 кг/м³.

Фотографии поверхностей газобетонных образцов после прочностных испытаний представлены на рис. 6. На приведенных фотографиях видно, что у газобетонов на геополимерном связующем (рис. 6, а) по сравнению с газобетоном на портландцементе (рис. 6, б) при сопоставимом расходе алюминиевой пудры наблюдаются более крупные и неравномерно распределенные поры, что можно объяснить большим газообразованием в результате взаимодействия алюминиевой пудры с гидроксидом натрия, содержащимся в геополимерном вяжущем, чем со свободным гидроксидом кальция портландцемента.

Результаты прочностных испытаний, представленные в табл. 4, свидетельствуют, что разработан-

ные газобетоны на геополимерном вяжущем достигли на 28-е сут твердения среднего значения прочности при сжатии в диапазоне 18,8–27,9 МПа, это соответствует заданному значению показателя не ниже 18 МПа. Прочность на растяжение при изгибе в том же возрасте находилась в пределах 2,28–4,09 МПа. Повышение прочностных показателей исследованных газобетонов с увеличением содержания доменного шлака в составе геополимерного связующего с 30 до 50 мас. % можно объяснить гидравлической активностью шлака, способствующую

Таблица 4
Table 4

Результаты испытаний образцов разработанных газобетонов на геополимерном вяжущем
The test results of samples of developed aerated concrete with geopolymer binder

Показатель	№ состава					
	1		2		3	
	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Средняя влажность в естественном состоянии в возрасте твердения 28 сут, мас. %	15,39	2,1	12,82	1,4	10,75	1,5
Средняя плотность во влажном состоянии в возрасте твердения 28 сут, кг/м ³	1602	4,8	1611	5,3	1619	5,5
Средняя плотность в сухом состоянии в возрасте твердения 28 сут, кг/м ³	1540	5,5	1560	4,8	1572	6,2
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	2,28	1,1	3,35	1,2	4,09	1,5
Прочность при сжатии, МПа:						
7 сут	11,5	2	17,1	1,9	19,8	2,3
14 сут	15,7	2,4	20,2	2,2	24,5	2,1
28 сут	18,8	2,7	24,9	2,6	27,9	2,6

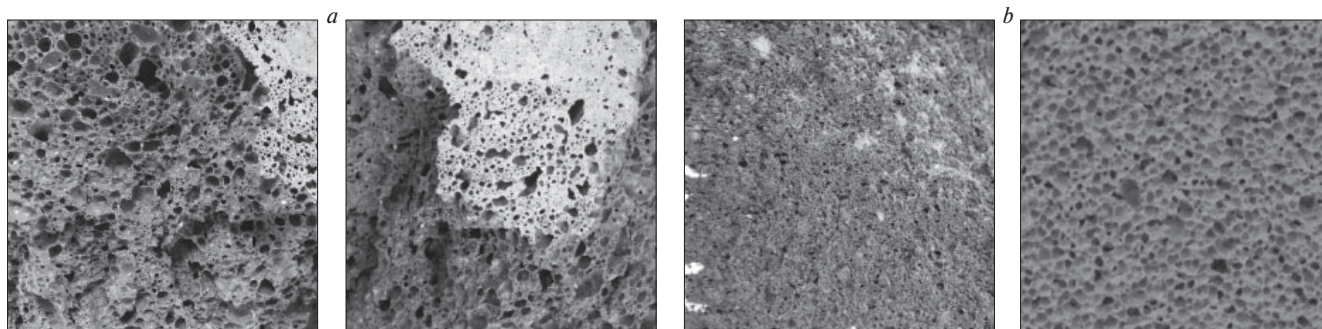


Рис. 6. Поверхности образцов газобетонов, разрушенных в результате прочностных испытаний: а – на геополимерном вяжущем; б – на портландцементе

Fig. 6. Surfaces of aerated concrete samples destroyed as a result of strength tests: a – on geopolymer binder; b – on Portland cement

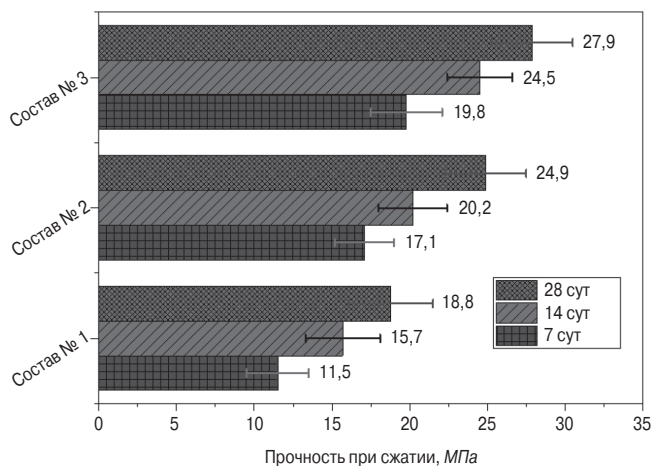


Рис. 7. Зависимость прочности при сжатии газобетонных образцов от времени твердения

Fig. 7. Dependence of compressive strength of aerated concrete samples on hardening time

шей появлению новых С–S–Н-образований, уплотняющих и упрочняющих структуру газобетона.

Рост прочности при сжатии газобетонных образцов на разработанном геополимерном вяжущем показан на рис. 7. Из полученных данных следует, что прочность в возрасте 7 и 14 сут составляет соответственно примерно 60 и 80% от их 28-сут прочности.

Выводы

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждена возможность получения газобетонов со средней плотностью в сухом состоянии менее 1600 кг/м^3 на геополимерном связующем, изготовленном с использованием многотоннажных отходов промышленных предприятий Вьетнама и состоящем из низкокальциевой золы-уноса ТЭС «Вунг Анг», доменного шлака металлургического завода «Хоа Фат», порошкообразного отхода производства сантехнических керамических изделий завода «ТОГО» и активирующего щелочного раствора, применяя в качестве газообразователя алюминиевую пудру.

2. Повышение прочностных показателей исследованных газобетонов с увеличением содержания

доменного шлака в составе геополимерного связующего с 30 до 50 мас. % можно объяснить гидравлической активностью шлака, способствующей появлению новых С–S–Н-образований, уплотняющих и упрочняющих структуру газобетона.

3. Следует продолжить научные исследования с целью установления оптимальных решений использования разработанных газобетонов на геополимерном вяжущем в реальных строительных объектах во Вьетнаме.

Список литературы / References

1. Truong Thi Kim Xuan, Nguyen Duy Hieu, Nguyen Huu Nhan. Use of lightweight concrete in construction work in Vietnam. Faculty of Civil Engineering. University of Architecture, Hanoi, 2010, pp. 10–18. (In Vietnamese).
2. Nguyen Van Chanh. The use of lightweight concrete in housing construction for sustainable urban development. Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, 2012. 56 p. (In Vietnamese).
3. Vu Kim Dien, Tang Van Lam, Bazhenova S.I. Review of properties and applications of foam concrete. Proceedings of the National Conference on Land and Natural Resources with Sustainable Development (ERSD 2020). Hanoi. 11/12/2020. (In Vietnamese).
4. Nguyen Van Phi4u, Nguyen Van Chanh. Lightweight concrete technology. Ed. Construction. 2005. 100 p. (In Vietnamese).
5. Nguyen Cong Thang, Pham Huu Hanh. Research to improve the quality of autoclaved aerated concrete used for super-tall buildings in Vietnam. *Journal of Construction Science and Technology*. 2014. No. 21. pp. 75–80. (In Vietnamese).
6. Dao Van Dung. Textbook on the technology of new materials in construction. Ed. Construction. 2021. 210 p. (In Vietnamese).
7. Nguye Duy Hieu. Technology for the production of high-quality lightweight concrete with hollow aggregate. Ed. Construction. 2016. 175 p. (In Vietnamese).
8. Vilches J. The development of novel infill materials for composite structural assemblies. Doctoral dis-

- sertation. Auckland University of Technology. 2014. (In Vietnamese).
9. Saidani M., Ogbologugo U., Coakley E., George S. Lightweight cementitious (GEM-TECH) structural material. *Conference: CITEDUB3 International Congress on Technology and Concrete Durability*. Algiers, Algeria. September 2016, pp.186-195.
 10. Chen G., Li F., Geng J., Jing P., Si, Z. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 294. 123572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123572>
 11. Nguyen Thanh Bang, Dinh Hoang Quan, Nguyen Tien Trung. Research into the use of an environmentally friendly combination of fly ash and blast furnace slag to produce concrete (without the use of cement) with an activated alkali binder suitable for irrigation and marine use. National level research project code KC.08.21/16-20.2021. 287 p. (In Vietnamese).
 12. Tang Van Lam, Bulgakov B.I. The possibility of using ash-slag waste and rice husk ash on geopolymer concrete for the construction of structures in Vietnam. *BDU Journal of Science & Technology*. 2021. Vol. 03. No. 01, pp. 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218>
 13. Al Bakri Abdullah M.M., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Yahya Z., and Razak R.A. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent. *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13. No. 6, pp. 7186–7198. Doi: 10.3390/ijms13067186
 14. Nguyen Trong Lam, Pham Huu Hanh. Research to improve the quality of autoclaved aerated concrete used for super-tall buildings in Vietnam. *Journal of Construction Science and Technology*. No. 21. 2014, pp. 75–80. (In Vietnamese).
 15. Tang Van Lam, Dien Vu Kim, Hung Ngo Xuan, Tho Vu Dinh, B. Bulgakov, S. Bazhenova. Effect of aluminium powder on light-weight aerated concrete properties. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. 02005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702005>
 16. Ву Ким Зиен. Ячеистые бетоны с использованием плазмомодифицированного доменного шлака: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 168 с.
 16. Wu Kim Zien. Cellular concrete using plasma-modified blast furnace slag. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2023. 168 p. (In Russian).
 17. Zhang J., Jiang N., Li H., Wu C. Study on mix proportion design of cement foam concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 439. No. 4. 2018. 042053. doi:10.1088/1757-899X/439/4/042053
 18. Trinh Ngoc Duy. Study of mechanical and mechanical properties of geopolymer mortar for lightweight brick production. Thesis for the degree of Master of Technical Sciences. Ho Chi Minh City Technical Pedagogical University. Ho Chi Minh City, 2016. 87 p. (In Vietnamese).
 19. ACI 211.4R-2008. Guide for selecting proportions for high-strength concrete using portland cement and other cementitious materials. 2010. 13 p.
 20. Shi C. Composition of materials for use in cellular lightweight concrete and methods thereof. *Advanced Materials and Technologies. LLC*. 2002. Vol. 1. No. 12, pp. 3–7.
 21. Kim D.V., Cong L.N., Van L.T., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic-mineral additives. *Journal of Physics: Conference Series. Modelling and Methods of Structural Analysis*. Vol. 1425. 2020, pp. 12–22. Doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012199
 22. Hamad J., Materials A., Production, properties and application of aerated lightweight concrete: review. *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2, pp. 152–158.
 23. Vietnam National Standard TCVN 9029:2017. Lightweight concrete. Products made from non-autoclaved foam and aerated concrete. Technical requirements. 16 p. (In Vietnamese).

ИнтерСтрой Экспо

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
строительных, отделочных материалов
и инженерного оборудования

16 | 17 | 18 АПРЕЛЯ 2024
Санкт-Петербург, КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Организатор — компания МВК
Офис в Санкт-Петербурге

МВК Международная
Выставочная
Компания

+7 (812) 401 69 55, interstroyexpo@mvk.ru

Забронируйте стенд:
interstroyexpo.com

IBC КОНГРЕСС
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ IBC



Георгию Романовичу БУТКЕВИЧУ 90 лет

6 ноября 2023 г. исполнилось 90 лет Георгию Романовичу Буткевичу — кандидату технических наук, почетному строителю России, почетному академику Академии горных наук, действительному члену Российского научно-технического общества строителей.

Г.Р. Буткевич родился в в Томске, затем семья переехала в Челябинск, где работал его отец на одном из горных предприятий. Родители дали сыну максимально возможное в то время разностороннее образование. Например, Георгий Романович вполне мог стать музыкантом — способности и подготовка позволяли. Однако, продолжая семейную традицию, он выбрал профессию горного инженера.

После окончания в 1957 г. Московского горного института Г.Р. Буткевич работал на карьерах мастером, сменным инженером, начальником участка. Этот важнейший опыт профессионального становления, глубокого понимания производственных реалий стал основой дальнейшей научной и просветительской деятельности молодого специалиста.

В 1960 г. Георгий Романович перешел на работу в институт ВНИПИИстромсырье (институт неоднократно менял название, но всегда оставалась суть — разработка и внедрение новых технологий и оборудования, оптимизация горного производства предприятий промышленности строительных материалов), занимая должности от младшего научного сотрудника до заведующего отделом.

Инженерная деятельность Г.Р. Буткевича связана с горной отраслью промышленности строительных материалов. Круг интересов: циклично-поточная и поточная технологии горных работ; управление характеристиками горной массы, поступающей на переработку; разработка обводненных месторождений без водопонижения. Им предложены и внедрены конструкции новых рабочих органов экскаваторов, технологические схемы горных работ. Часть из них внедрены.

Георгием Романовичем опубликовано более 270 печатных работ в отечественных и зарубежных изданиях. Большинство без соавторов. В статьях Георгий Романович использовал множество собственных фотографий, выполненных на карьерах при внедрении нового оборудования и технологических схем. В настоящее время это ценная историческая отраслевая информация. Он в отличие от многих коллег придавал большое значение популяризации горного дела в профессиональной строительной среде, поэтому активно сотрудничал с профильными газетами, где опубликовано более 50 статей.

В 1963 г. Г.Р. Буткевич стал автором журнала «Строительные материалы». За 60 лет он опубликовал без малого 90 статей, и трудно подсчитать, сколько еще статей было подготовлено при его непосредственном участии. Долгие годы Георгий Романович был активным членом редакционного совета журнала, именно его усилиями рубрика «Сырьевая база отрасли» была одной из самых динамичных. Несомненной заслугой Г.Р. Буткевича было привлечение к сотрудничеству с журналом руководителей горных предприятий, которые публиковали статьи о внедрении новых технологий и оборудования.

Значительное внимание Г.Р. Буткевич уделял общественно-инженерной деятельности, связанной с горной отраслью промышленности строительных материалов. После образования в Научно-техническом обществе стройиндустрии (с 1992 г. РНТО строителей) в 1969 г. секции «Нерудные строительные материалы» активно участвовал в организации конференций, семинаров, выставок, конкурсов. В тяжелые 1990-е гг. и ему удалось сохранить традиции регулярного проведения конференций, ранее всесоюзных совещаний, получивших статус международных. Систематически проводились заседания секции, в которых принимали участие специалисты, включая руководителей предприятий, со всей территории РФ.

Георгий Романович Буткевич стоял у истоков и был одним из идейных вдохновителей создания ассоциации «Недра» — некоммерческого объединения производителей и потребителей минерального сырья для производства строительных материалов, объединившего специалистов нескольких стран.

За годы совместной работы Георгий Романович Буткевич стал не просто коллегой и автором, примером преданности отрасли, но настоящим другом буквально каждому сотруднику редакции. Его письма читаем вместе, каждый звонок из-за океана — праздник. Желаем дорогому Георгию Романовичу здоровья и бодрости, неиссякаемой энергии и долгие лета.

УДК 622.268

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-70-74>

Г.Р. БУТКЕВИЧ, канд. техн. наук (georgybutkevich@gmail.com)

РНТО строителей

Комплексное освоение техногенных ресурсов

Вскрышные и вмещающие породы месторождений обычно содержат попутные полезные ископаемые. Если не применяется селективная разработка, эти полезные ископаемые перемещаются в отвалы и укладываются бессистемно. Чтобы сохранить минеральные ресурсы, необходимо создавать техногенные месторождения. В статье рассматриваются перспективы комплексного

освоения минеральных ресурсов. Приведены примеры создания техногенных месторождений в выработанном пространстве карьера. Отмечена необходимость принятия законов, стимулирующих формирование техногенных месторождений.

Ключевые слова: полезное ископаемое, техногенное месторождение, попутное полезное ископаемое, комплексное освоение минеральных ресурсов, шламохранилище.

Для цитирования: Буткевич Г.Р. Комплексное освоение техногенных ресурсов // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 70–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-70-74>

G.R. BUTKEVICH, Candidate of Sciences (Engineering)

Integrated Development of Technogenic Resources

Overburden and host rock deposits typically contain by-products. If selective mining is not applied, these aggregates are moved to dumps and deposited haphazardly. To preserve mineral resources, it is necessary to create man-made technogenic deposits. This article explores the prospects of comprehensive mineral resource development. Examples of creating technogenic mineral deposits in exhausted quarry spaces are provided. We emphasize the need for the enactment of laws that promote the formation of technogenic deposits.

Keywords: mineral, technogenic deposit, associated mineral, integrated development of mineral resources, sludge storage.

For citation: Butkevich G.R. Integrated development of technogenic resources. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 70–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-70-74>

С появлением на планете Земля мыслящих существ началось сознательное использование природных ресурсов. С увеличением численности населения, повышением культуры увеличивался объем и количество видов потребляемых природных ресурсов. Возникла потребность в минеральном сырье, и началось освоение недр.

Приобретение новых знаний позволило увеличить глубину проникновения в толщу Земли. Начали формироваться отвалы вскрышных пород и отходов переработки полезных ископаемых. Рост их объемов увеличивает нагрузку на экосистему. Это может привести в долгосрочной перспективе к непредсказуемым последствиям, сравнимым с катастрофами геологического или космического происхождения.

В обществе растет понимание того, что природные ресурсы ограничены, что необходимо бережно, экономно их расходовать и находить способы сохранения попутных полезных ископаемых. Один из способов – создание техногенных месторождений (ТМ).

Большинство месторождений разрабатывается ради добычи одного полезного ископаемого. И хотя вскрышные и вмещающие породы обычно содержат потенциальные полезные ископаемые, их, как правило, перемещают в отвалы. Более того, укладывают бессистемно, перемешивают, из-за чего такие минеральные ресурсы для дальнейшего использования становятся непригодными. Создание дополнительных технологических линий для раздельной выемки и складирования потенциальных полезных ископаемых требует значительных вложений и усложняет процессы горных работ.

Стремление к максимальному использованию природных ресурсов привело к появлению нового направления – комплексное освоение природных ресурсов. В горной промышленности оно стало развиваться с середины прошлого века под руководством академика Н.В. Мельникова. Ведущую роль в развитии этого направления продолжает играть Институт проблем комплексного освоения недр (ИПКОН) РАН, созданный по его инициативе и носящий его имя [1].

Образования антропогенного происхождения, в которых накапливались минеральные ресурсы, не имели статуса техногенных месторождений (ТМ). Многие годы при разработке месторождений драгоценных металлов и других полезных ископаемых отходы переработки укладывались в отвалы, которые по мере совершенствования технологии добычи и переработки минерального сырья разрабатывались повторно.

Какие материалы могут получать статус ТМ? Есть сторонники относить к таким материалам только минеральные вещества, получаемые в результате антропогенной деятельности. Но в такое определение не вписываются отходы металлургической, строительной и других отраслей, объемы отходов в которых велики, а также развалины зданий, в том числе из-за землетрясений [2]. Неблагодарные потомки использовали пирамиды и Колизей в качестве источника получения качественного камня. Чем не техногенные месторождения?

Решение о создании ТМ принимается с учетом перспектив использования одного или нескольких попутных полезных ископаемых в обозримом будущем. В расчетах процессов горного цикла, обосновывающих такое решение, должно использоваться только уже созданное оборудование и технологии. Этими расчетами определяется экономически оправданный радиус перевозки потенциальному потребителю. Для общераспространенных полезных ископаемых расстояние перевозки обычно находится в пределах границы области или ближайших областей. Необходимо учитывать допустимый срок хранения пород (в различных климатических поясах этот период отличается в разы), а также их воздействие на окружающую среду.

Создаваемое ТМ должно вписываться в схему долгосрочного планирования развития определенной территории (области), исходя из потребности находящихся на этой территории производств и намеченных к строительству, т. е. конкретное ТМ для конкретного предприятия.

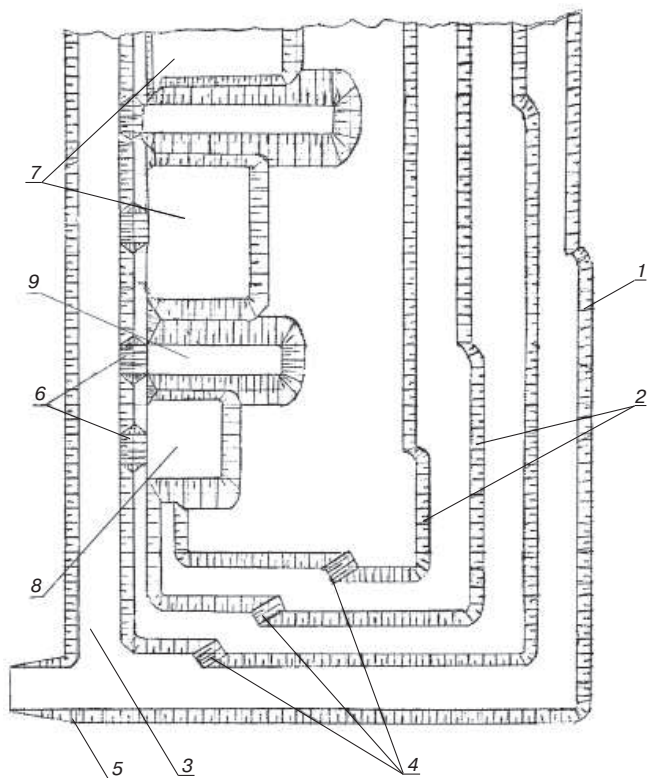


Рис. 1. Создание техногенных месторождений при разработке необводненного месторождения: 1 – вскрышной уступ; 2 – добычной уступ; 3 – транспортная перемычка; 4 – скользящий съезд; 5 – выездная траншея; 6 – стационарный съезд; 7 – штабель полезного ископаемого (техногенного месторождения); 8 – штабель вскрышной породы; 9 – разделительный штабель

Fig. 1. Creation of technogenic deposits during the development of an unwatered deposit: 1 – overburden ledge; 2 – mining ledge; 3 – transport jumper; 4 – sliding ramp; 5 – exit trench; 6 – stationary ramp; 7 – stack of minerals (technogenic deposit); 8 – stack of overburden rock; 9 – separation stack

О терминологии. Хотя термин «техногенное месторождение» понимается одинаково, скопление продукта – одного из элементов цикла горных работ – называют по-разному: шламохранилище, хвостохранилище, карта намыва, пруд-отстойник, полигон, отвал, временный склад, шлабассейн.

Главный инженер Ковдорского ГОКа Ф.Б. Кампель рассказывал курьезный случай, как новая сотрудница маркшейдерского отдела комбината, которая копировала план поверхности, спросила, почему площадь скотомогильника меньше хвостохранилища. Различия в названиях объекта складирования имеют финансовые последствия. От присвоенного названия и его юридического толкования зависит ставка налога, возможность получение льгот и т. д.

За редким исключением, например керамического сырья, материал ТМ при переработке расходуется не полностью, т. е. снова образуются отходы. При переработке ряда полезных ископаемых продукт, полученный после переработки, составляет несколько процентов. Золоторудные месторождения теперь разрабатывают при соотношении 1 г золота на 1 т горной массы. Так что при вторичной переработке объем отходов может уменьшиться незначительно. Создание площадки для ТМ по затратам и продолжительности работ сопоставимо со строительством

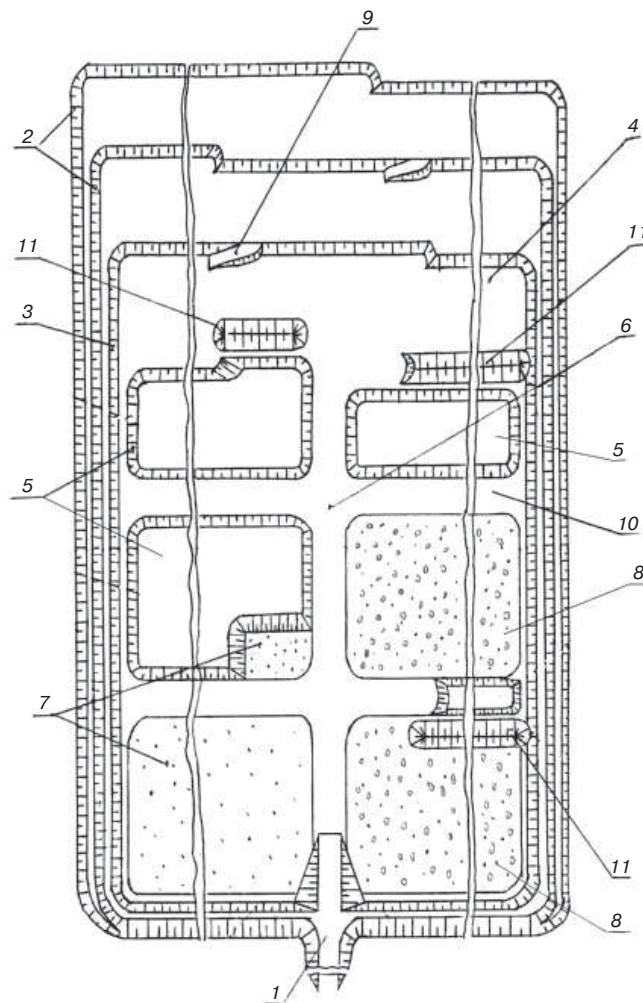


Рис. 2. Создание техногенных месторождений при разработке частично обводненного месторождения: 1 – выездная траншея; 2 – вскрышной уступ; 3 – добычной уступ; 4 – верхняя рабочая площадка обводненного уступа; 5 – карты; 6 – транспортная перемычка; 7 – внутренний отвал вскрышных пород; 8 – техногенное месторождение; 9 – скользящий съезд; 10 – транспортный целик, разделяющий карты; 11 – обезвоживающий штабель полезного ископаемого

Fig. 2. Creation of technogenic deposits during the development of a partially watered field: 1 – exit trench; 2 – overburden ledge; 3 – production ledge; 4 – upper working platform of the flooded ledge; 5 – maps; 6 – transport jumper; 7 – internal overburden dump; 8 – technogenic deposit; 9 – sliding ramp; 10 – transport pillar separating cards; 11 – dewatering stack of minerals

карьера такой же производительности. Приведенные примеры технологических схем разработки месторождений с созданием ТМ в выработанном пространстве карьера показывают, что технология горных работ значительно усложняется.

Разработка необводненного месторождения (рис. 1). В выработанном пространстве карьера размещается несколько техногенных месторождений и отвал вскрышных пород. Вскрышные породы разрабатываются одним уступом 1. Полезная толща, сформировавшаяся участки различных потенциальных полезных ископаемых, разрабатывается тремя уступами 2. Вскрышные породы и потенциальные полезные ископаемые перемещаются самосвалами до разгрузочной площадки 3, полезное ископаемое с добычных уступов по скользящим съездам 4 через выездную траншею 5 вывозится на поверх-

ность. Самосвалы, загруженные вскрышными породами или потенциальным полезным ископаемым, доезжают по тем же скользящим съездам 4 и разгрузочной площадке 3 до стационарных съездов 6 к соответствующим штабелям потенциальных полезных ископаемых 7 или вскрышных пород 8. Разделительные штабеля из инертных материалов 9 отсыплются с опережением по отношению к штабелям потенциальных полезных ископаемых и вскрышных пород.

При разработке частично обводненных месторождений, когда выработанное пространство карьера заполняется водой, требуются иные решения. Одно из них, необходимое при внутреннем отвалообразовании, — создание на нижнем горизонте карьера, заполняемого водой, карт (рис. 2). Цель создания карт — не допустить перемещения размокших вскрышных пород, уложенных в заполненном водой выработанном пространстве, к подошве нижнего добычного уступа, т. е. разубоживанию полезного ископаемого. Опыт работы карьера Гралево (Витебская обл., Беларусь), добывающего доломит, показал, что породы вскрыши размокают и перемещаются, не имея преграды, до обводненного забоя, разрабатываемого драглайном ЭШ-10/70.

Месторождение вскрывается капитальной траншеей 1. Нарезаются два вскрышных уступа 2 и один добычной 3. Добычной уступ разделен на два подступа. Верхний разрабатывается мехлопатором, нижний, обводненный, — драглайном. По мере продвижения добычных работ образуется выработанное пространство 4, площадь которого достаточна для создания карт 5. Транспортная перемычка 6 разделяет выработанное пространство на два крыла, на каждом из которых создаются карты 5, предназначенные для размещения вскрышных пород 7 и формирования ТМ 8. Вскрышные породы по скользящим съездам 9 перемещаются к транспортной перемычке 6 и укладываются в карты 7. Полезное ископаемое из транспортных коммуникаций, проложенных по кровле обводненного горизонта (транспортная перемычка 6 и перемычки между картами 10), извлекается, укладывается в штабель 11 и после отделения свободой воды вывозится на поверхность.

Однако идеи о создании ТМ и использовании отходов переработки минерального сырья для выпуска продукции и других целей станут реальностью, когда будут созданы стимулы. Например, в ряде стран приняты законы, предоставляющие налоговые льготы фирмам, которые выпускают продукцию из отходов, а размер налога на землю зависит от вида размещаемых отходов.

Определенная работа проводится и в нашей стране. Но государственная политика России не относит проблему комплексного использования природных ресурсов к важнейшим. Чтобы эта проблема вошла в число приоритетных в законодательной деятельности Госдумы РФ, нужна активная поддержка населения, которая возникнет только в случае, если люди осознают важность ее решения.

Пока можно констатировать, что люди, живущие в относительной близости от карьеров, настроены по отношению к горным работам скорее отрицательно, а к призывам бережно относиться к природным ресурсам равнодушны практически все. Чтобы положение изменить, необходима целеустремленная работа по разъяснению населению значения минеральных ресурсов. В горняцких поселках не встретишь улиц, названных в честь людей, которые создавали предприятие, редко увидишь стенды с фотографиями и текстами об истории предприятия. Хотя даже такая несложная агитация может повысить лояльность людей, превратить их в союзников по борьбе за сохранность экосистемы планеты, бережное отношение к потреблению природных ресурсов.

Важен и моральный фактор. Невольно начинаешь испытывать уважение к людям горной профессии, глядя на фигуры рабочих высотой в два человеческих роста, стоящих на пьедесталах. Эти фигуры установлены при входе на выставку горного оборудования КОНЭКСПО-2023, Лас-Вегас, США [3].

Крупные карьеры иногда становятся объектом экскурсий. Посетители видят масштаб горных работ, огромное сложное оборудование, получают информацию о применении разрабатываемых полезных ископаемых, их важности для экономики региона и страны. Это дает понимание, что ресурсы безграничны, а влияние их выработки на экосистему трудно переоценить.

Заключение

1. Не менее 75–80% материалов и энергии производится из минерального сырья [4]. Объем потребляемых природных ресурсов непрерывно увеличивается. Совершенствование техники и технологии позволяет вовлекать в эксплуатацию месторождения с менее благоприятными горно-геологическими условиями. Вследствие этого непропорционально растет объем отходов и нагрузка на окружающую среду.

2. Вскрышные и вмещающие породы месторождений обычно содержат попутные полезные ископаемые. При валовой выемке эти попутные полезные ископаемые теряются. Селективная выемка и складирование попутных полезных ископаемых и отходов переработки, т. е. создание ТМ, применяются редко, поскольку увеличивают затраты. Чтобы предприятия стремились создавать ТМ, нужны стимулы, принимаемые на законодательном уровне в форме поправок к «многострадальному» Закону от 28.04.2023 № 146-ФЗ «О внесении изменений в статьи 8 и 22 Закона Российской Федерации «О недрах».

3. Решение о создании ТМ целесообразно вменить Министерству природных ресурсов и экологии РФ на основании долгосрочных планов развития областей, чтобы создать резервные месторождения для конкретных предприятий и обеспечить доставку минерального сырья с минимальным расстоянием транспортирования.

4. Процесс создания ТМ вписывается в уже сложившуюся систему горного производства, которая обеспечена инструктивными, нормативными и другими документами. Специфика нового процесса требует корректировки действующих и разработки новых документов. Среди них важнейшим являются «Нормы технологического проектирования ТМ», которые должны быть межотраслевыми, поскольку свойства попутных полезных ископаемых, содержащихся во вскрышных и вмещающих породах и отходах переработки, разнообразны. Необходимо также дополнить Закон РФ «О недрах» разделом о терминологии.

Список литературы

1. Развитие идей Н.В. Мельникова в области комплексного освоения недр. М.: УРАН ИПКОН РАН, 2009 (сборник статей к 100-летию со дня рождения).
2. Трубецкой К.Е., Барский Л.А. Техногенные месторождения // *Горная энциклопедия*. Т. 1/5, 1991. С. 120.
3. Pit and Quarry, 2023, May.

4. Архипов А.В., Решетняк С.П. Техногенные месторождения. Разработка и формирование / Под науч. ред. акад. Н.Н. Мельникова. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.

References

1. Razvitie idei N.V. Mel'nikova v oblasti kompleksnogo osvoeniya neдр [Development of ideas N.V. Melnikov in the field of integrated subsoil development]. Moscow: URAN IPKON RAN. 2009 (Collection of articles for the 100th anniversary of birth).
2. Trubetskoi K.E., Barskii L.A. Technogenic deposits. *Gornaya entsiklopediya* [Mountain encyclopedia]. Vol. 1/5. 1991. P. 120.
3. Pit and Quarry, 2023, May.
4. Arkhipov A.V., Reshetnyak S.P. Tekhnogennyye mestorozhdeniya. Razrabotka i formirovaniye [Technogenic deposits. Development and formation], under scientific ed. N.N. Melnikova. Apatites: KNTs RAN. 2017. 175 p.

Белорусскому заводу «Кричевцементношифер» 90 лет!



10 ноября 1933 г. в 16 ч был зажжен рабочий факел в первой вращающейся печи Кричевского цементного завода. С тех пор развитие ОАО «Кричевцементношифер» неразрывно связано с историей Кричева – небольшого, но древнего города на востоке Могилевской области. И судьбы людей тесно переплелись с судьбой завода – практически в каждой семье Кричева кто-то из родственников работает на заводе.

Место для строительства завода было выбрано не случайно. В окрестностях Кричева геологи обнаружили большие залежи мела и глины. Завод по праву считался одним из гигантов-первенцев первого пятилетнего плана развития народного хозяйства, разработанного согласно курсу на индустриализацию промышленного потенциала СССР. Оборудование было закуплено в Германии, его монтажом руководили немецкие специалисты.

В 1940 г. предприятие достигло проектной мощности 130 тыс. т цемента в год. Но его поступательное развитие прервала Великая Отечественная война. Завод частично эвакуировали, невывезенное оборудование взорвали. Многие работники мобилизованы на фронт.

17 июля 1941 г. Кричев был захвачен гитлеровцами. На территории завода устроили концентрационный лагерь, в котором за годы оккупации погибли более 18 тыс. человек. Эта страшная страница истории не забыта. У проходной завода установлен памятник.

После освобождения Кричева 30 сентября 1943 г. сразу началось восстановление цементного завода. В январе 1949 г. в эксплуатацию сдана первая технологическая линия, в июле введена в строй вторая очередь. До конца года уже было выпущено 65 тыс. т цемента. Проектная мощность восстановленного завода увеличена до 180 тыс. т.

В 1957 г. цементный и шиферный заводы объединены в одно предприятие – Кричевский цементно-шиферный комбинат.

За высокие достижения звание Героя Социалистического Труда присвоено двум работникам предприятия: Ивану Могилевцеву (1958) и Анатолию Готовчику (1975), шесть человек награждены орденом Ленина, 14 – орденом Трудового Красного Знамени, многие работники предприятия удостоены высоких наград и почетных званий.

В конце 1990-х встал вопрос о закрытии предприятия, но люди во главе со своим лидером, новым генеральным директором завода Н.Н. Дудыко (возглавлял завод до 2011 г.) не только отстояли завод, но и сделали его лучшим в Белоруссии: в 2002 г. приобрели новое оборудование и наладили производство цветного шифера с полимерным покрытием; в 2007 г. было произведено 1,17 млн т цемента, а годовое производство шифера достигло 88,8 млн усл. плиток. 22 февраля 2008 г. был успешно проведен розжиг новой вращающейся печи.

Рубежом в развитии предприятия стал 2013 г., когда осуществили переход с мокрой технологии изготовления цемента на сухую. Первый миллион тонн цемента был произведен в 2014 г.

В феврале 2015 г. генеральным директором ОАО «Кричевцементношифер» назначен В.И. Корчевский.

Уже в декабре этого года была запущена линия по измельчению торфобрикета для сжигания в горелках декарбонизатора, что позволило в полном объеме реализовать мероприятия по энергосбережению.

В апреле 2021 г. ОАО «Кричевцементношифер» преодолел десятилетний рубеж по выпуску цемента сухим способом.

Во все времена рабочий класс считался цементирующей силой общества. Средний возраст сотрудников завода 43 года, а 117 человек – до 31 года. На «Кричевцементношифере» работает много трудовых династий. Среди них есть такие, чей общий трудовой стаж перешагнул 200 лет. Например, общий трудовой стаж династии Бондысевых составляет более 340 лет!

В настоящее время ОАО «Кричевцементношифер» входит в состав холдинга «Белорусская цементная компания». Это современное процветающее предприятие с современным оборудованием и технологией, соответствующими требованиям международного стандарта ISO 14001. Его продукция востребована не только в Белоруссии, но и в России и Польше. Основными потребителями кричевского цемента являются строительные и ремонтно-строительные организации, домостроительные комбинаты, заводы железобетонных изделий и силикатных материалов, торговые организации.

Желаем коллегам дальнейших успехов и процветания!

УДК 66.045.3

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-75-79>

Е.И. ЮМАШЕВА, инженер-химик-технолог, главный редактор (mail@rifsm.ru)

ООО РИФ «Стройматериалы» (127343, Москва, Дмитровское ш, 9, стр. 3)

Рынок отделочных и теплоизоляционных материалов в 2023 г.

В Санкт-Петербурге 12–13 октября 2023 г. состоялась 15-я ежегодная конференция компании «Строительная информация». В ее работе приняли участие более 120 представителей от 72 организаций из трех стран – коммерческие директора, руководители отделов маркетинга, дилерских центров, специалисты по снабжению и сбыту. Традиционно на конференции рассматриваются итоги работы за прошедший год строительного комплекса России в целом, а также ряда подотраслей промышленности строительных материалов. В докладах участников конференции представлены основные результаты работы предприятий сухих строительных смесей, гипсовых отделочных материалов, теплоизоляционных материалов на минеральной и полимерной основе, фасадных систем, лакокрасочных материалов. Дан прогноз развития этих подотраслей на краткосрочную перспективу.

Ключевые слова: экономика, статистика, анализ рынка, сухие строительные смеси, гипсовые отделочные материалы, теплоизоляционные материалы, минеральная вата, кварцевая вата, стекловата, пенополистирол, экструзионный пенополистирол, фасадные системы, лакокрасочные материалы.

Для цитирования: Юмашева Е.И. Рынок отделочных и теплоизоляционных материалов в 2023 г. // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-75-79>

E.I. YUMASHEVA, Engineer (mail@rifsm.ru)

APC «STROJMATERIALY» (3 build, 9, Dmitrovskoe Highway, 127343, Moscow, Russian Federation)

Market of Finishing and Thermal Insulation Materials in 2023

The 15th annual conference of the Construction Information company took place in St. Petersburg on October 12–13, 2023. More than 120 representatives from 72 organizations from three countries took part in its work – commercial directors, heads of marketing departments, dealer centers, supply and sales specialists. Traditionally, the conference examines the results of the work of the Russian construction complex as a whole over the past year, as well as a number of sub-sectors of the building materials industry. The main results of the work of the industry of dry building mixtures, gypsum finishing materials, mineral and polymer-based thermal insulation materials, facade systems, paint and varnish materials, voiced in the reports of conference participants, are presented. The forecast for the development of these sub-sectors for the short term is also shown.

Keywords: economics, statistics, market analysis, dry building mixtures, gypsum finishing materials, thermal insulation materials, mineral wool, quartz wool, glass wool, polystyrene foam, extruded polystyrene foam, facade systems, paint and varnish materials.

For citation: Yumasheva E.I. Market of finishing and thermal insulation materials in 2023. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 75–79. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-75-79>

Специалисты неоднократно обращали внимание, что методика сбора и обработки официальных статистических данных по производству строительных материалов дает лишь приблизительное представление о состоянии отрасли. Строить производственную и сбытовую политику на данных Росстата крайне затруднительно. В этой ситуации на помощь производителям и коммерсантам приходит, например, компания «Строительная информация», которая с середины 2000-х гг. занимается исследованием рынков различных строительных материалов как по заказам, так и в инициативном порядке.

Компания специализируется на рынке продукции одной отрасли, это дает возможность собирать достоверную информацию из первых рук и глубоко анализировать полу-

ченные данные. А поскольку рынок ряда материалов мониторится много лет, то имеется база для отслеживания изменения конъюнктуры и проведения сравнительного анализа.

Именно эта скрупулезность и последовательность привлекают к постоянному сотрудничеству с компанией «Строительная информация» крупных производителей строительных материалов, а также такие международные консалтинговые агентства, как «Роланд Бергер Стрэтеджи Консалтенгс ГмбХ», «Bain & Company Germany» и др.

И именно за актуальной информацией и объективной оценкой перспектив развития рынка едут на конференцию специалисты, отвечающие в компаниях за продажи и стратегию.



Прежде чем приступить к рассмотрению отдельных рыночных сегментов строительных материалов, участники оценили предварительные результаты работы строительной отрасли России в 2023 г. и перспективы на 2024 г. Доклад подготовил директор Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий МГСУ, профессор **А.П. Пустовгар**. Он привел основные промежуточные результаты за восемь месяцев 2023 г.

Всего за январь–август в России введено более 70,2 млн м² жилья, что составляет 100,7% к соответствующему периоду 2022 г. Средний ввод на душу населения – 0,482 м² на чел., причем в пяти субъектах превышен уровень 0,8 м² на чел., а Ленинградская область превысила уровень в 1,45 м² на чел.

Доля ИЖС – 42 млн м² (59,9%), это 70,6% годового уровня, заданного по Нацпроекту (85 млн м²), причем в восьми субъектах доля ИЖС составила более 80%, в трех – 100%.

Тревожные тенденции: на фоне быстрого роста ипотечных кредитов (на первичном рынке жилья 1740 млрд р. – 144% уровня 2022 г.; на вторичном рынке – 2803 млрд р. – 191% уровня 2022 г.) растет количество непроданного жилья с 30% в 2023 г. до 53% в 2026 г. (по прогнозам). При этом стоимость квадратного метра тоже растет весьма уверенно.

Поскольку все построенное надо как-то отделывать, обратимся к отделочным материалам, среди которых лидируют материалы на основе гипса – сухие смеси, гипсокартон, пазогребневые гипсовые плиты, гипсоволокнистые листы, гипсостружечные плиты.

В докладе **Елены Потапенко** («Строительная информация») показано, что рынок гипсовых отделочных материалов высококонцентрированный. Два основных игрока, компании КНАУФ и ВОЛМА, занимают львиную долю рынка ГКЛ, ГВЛ и ГПП.

Общая мощность заводов по выпуску **гипсокартонных листов** (ГКЛ) по состоянию на начало 2023 г. составляет 479 млн м², что на 3% больше к уровню 2022 г. Рост обусловлен запуском производства ГКЛ на Хабезском гипсовом заводе (мощность 15 млн м² в год). Объем потребления составит в 2023 г. порядка 232 млн м² (рис. 1).

Основными потребителями ГКЛ остаются Москва и Московская область и Приволжский ФО, на долю которых приходится 23 и 17% соответственно.

Импорт практически не влияет на объем внутреннего потребления ГКЛ (после 2015 г. доля импорта <1% потребления). В 2022 г. объем импорта составил <1 млн м² (-42% к 2021 г.), а объем экспорта – 16 млн м² (на 27% меньше, чем в 2021 г.). Самые заметные объемы экспорта в 2022 г. пришлось на Монголию – 37%, Казахстан – 27% и Беларусь – 21%.

На рынке **пазогребневых гипсовых плит** (ГПП) также два основных лидера, однако первое место уверенно держит корпорация ВОЛМА, которая владеет шестью производственными площадками ГПП из двадцати одной (порядка 46% от общего объема). Компания КНАУФ выпускает ГПП на трех производственных площадках (11%). Всего ГПП выпускает 16 компаний. Совокупная мощность составляет 23 млн м² (по состоянию на конец 2022 г.; +1% к 2021 г.). В 2023 г. возобновил работу завод «Гипсолит» (Каббалкгипс).

Импорт и экспорт ГПП практически не осуществляются, поэтому объем выпуска приблизительно равен объему потребления (рис. 2) и составил в 2022 г. 15 млн м², что на 9% больше, чем в 2021 г.

Доля полнотелых ГПП условно постоянна – порядка 23%; более 81% объема выпуска приходится на ГПП толщиной 80 мм, 19% составляют ГПП толщиной 100 мм. Хабезский гипсовый завод начал выпускать плиты толщиной 150 мм, но их доля на рынке пока ничтожно мала.

Лидерами потребления ГПП в 2022 г. также являлись Москва и Московская область (45%) и Приволжский ФО (17%). Однако самый высокий прирост потребления показали Северо-Кавказский ФО (29%), Северо-Западный ФО без учета СПб и ЛО (27%), а также Санкт-Петербург и Ленинградская область (23%).

Гипсостружечные плиты в России выпускает с 2010 г. Пешеланский гипсовый завод. Последние годы выпуск/потребление этого материала снижались постепенно, однако в 2022 г. падение составило 40%, до 0,9 млн м². Эксперты прогнозируют в 2023–2025 гг. стабилизацию производства/потребления гипсостружечных плит на уровне 1 млн м².

Гипсоволокнистые плиты также выпускает единственная компания – КНАУФ – на двух производственных площадках в Челябинске и Нижегородской области. С 2020 г. потребление этого материала стабилизировалось на уровне 19,2–19,9 млн м², и такая стабильность прогнозируется на ближайшие два года.

В общем по рынку гипсовых отделочных материалов прогноз на 2023 г. следующий:

- гипсокартон: объем продаж 235 млн м², +4% к 2022 г.;
- гипсоволокнистые плиты: объем продаж 20 млн м², +2% к 2022 г.;

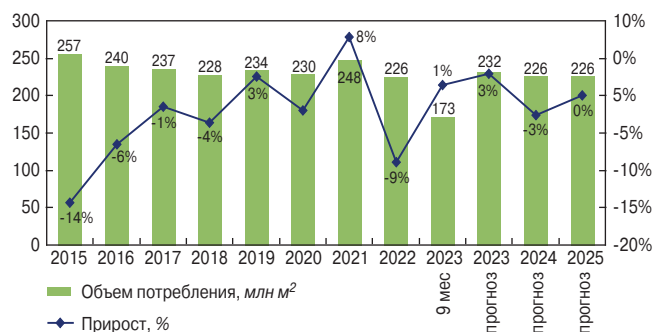


Рис. 1. Объем и динамика потребления ГКЛ в России
Fig. 1. Volume and dynamics of gypsum board consumption in Russia



Рис. 2. Объем и динамика потребления ГПП в России
Fig. 2. Volume and dynamics of consumption of gypsum sinus plates in Russia

– пазогребневые плиты: объем продаж 14,1 млн м², -6% к 2022 г.;

– гипсостружечные плиты: объем продаж 1 млн м², +20% к 2022 г.

В докладе **Евгения Ботки** («Строительная информация») «Рынок сухих строительных смесей России: предварительные итоги года и краткосрочный прогноз» показано, что в 2022 г. произошло умеренное увеличение совокупной мощности заводов ССС, а также изменение собственников ряда предприятий. Резко изменился спектр используемого химического сырья (добавок), что, с одной стороны, обусловило спад выпуска модифицированных смесей на 4%, до 11,7 млн т, а с другой – резкий рост цен на смеси (в среднем на 17%).

Объем продаж ССС составил 210 млрд р. в розничных ценах. Естественно, сократился экспорт смесей, хотя не фатально – на 10% (до 258 тыс. т).

В структуре потребления ССС в 2022 г. преобладали смеси на цементной основе – 5995 тыс. т (на гипсовой основе 5282 тыс. т).

Среди групп ССС преобладают, как и годом ранее, гипсовые штукатурные смеси – 4178 тыс. т (-3%), затем следуют плиточные клеи на цементной основе – 2503 тыс. т (-5%), третье место по объему потребления занимают штукатурные цементные смеси – 1169 тыс. т (+7%).

Самую большую долю рынка потеряли гипсовые монтажные смеси (-14%, 66 тыс. т) и гипсовые ровнители для пола (-13%, 602 тыс. т).

В общем на рынке ССС безраздельно властвует компания КНАУФ, занимая долю 14,7%. Однако в различных сегментах есть свои лидеры. Например, на рынке плиточных клеев самая большая доля рынка у компаний «Черезит» и «Юнис» – 13,7 и 12,7% соответственно.

Прогноз потребления отделочных материалов всегда коррелируется с прогнозом строительства, в первую очередь жилья. Специалисты компании «Строительная информация» для рынка ССС сделали оптимистичный, наиболее вероятный и пессимистичный прогнозы. Приведем показатели наиболее вероятного прогноза (табл. 1).

Рынок сухих смесей и теплоизоляции стран Центральной Азии в первую очередь интересен российским производителям своим потенциалом потребления. В докладе **Евгения Ботки** приведены интересные сравнительные таблицы (табл. 2, 3), данные которых показывают, что наиболее защищенным собственным производством является рынок Казахстана. Определенный потенциал для экспортирования ССС и ТИМ имеют рынки Узбекистана, Кыргызстана и Таджикистана.

Наталья Скороходова, исп. директор компании «Строительная информация», представила доклад о рынке теплоизоляционных материалов России. При оценке данного рынка особенно фактурно проявляются недостатки официальной статистической методики.

В первую очередь данные опроса производителей теплоизоляционных материалов на минеральной основе (коих не так много и опросить их несложно) почти вдвое расходятся с данными Росстата. Оказывается, ОКВЭД 23.99.6: Производство минеральных тепло- и звукоизоляционных материалов и изделий учитывает кроме собственно мине-

Таблица 1
Table 1

Наиболее вероятный вариант прогноза развития рынка ССС на 2023–2025 гг.
Most Likely Forecast Variant for Dry Building Mixtures Market Development 2023–2025

Показатель	Годы		
	2023	2024	2025
Емкость рынка, тыс. т	12150	12515	13016
Динамика, %	+5	+3	+4

Таблица 2
Table 2

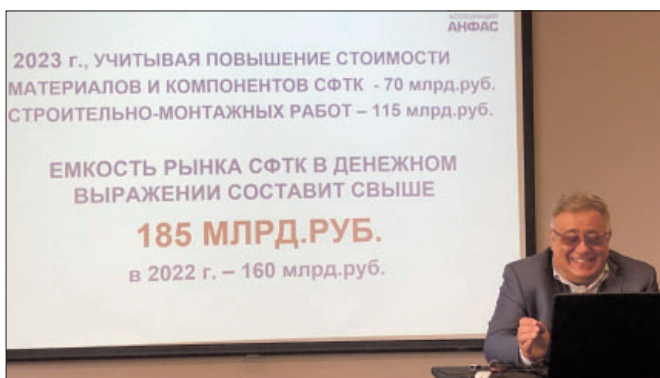
Сравнительная характеристика рынков ТИМ России и стран Центральной Азии
Comparative characteristics of thermal insulation materials markets in Russia and Central Asia

Параметр сравнения	Россия	Казахстан	Узбекистан	Кыргызстан
Подушевой ВВП (по ППС), тыс. долл. США	33,3	30,5	9,6	5,9
Население, млн чел.	146,45	19,12	35,27	6,7
Ввод жилья, млн м ² , 2022 г.	102,7	15,67	15,03	1,12
Ввод жилья, м ² /чел.	0,7	0,82	0,43	0,17
Совокупное потребление ТИМ, млн м ³	48,33	4,19	2,48	0,53
Потребление ТИМ по товарным группам, м ³ на м ² нового жилья				
Каменная вата	0,26	0,13	0,05	0,16
Стекловолоконная вата	0,1	0,06	0,06	0,12
Всего минераловатных ТИМ	0,36	0,18	0,12	0,28
Всего ТИМ	0,47	0,27	0,17	0,47
Подушевое потребление ТИМ по товарным группам, м ³ на чел.				
Каменная вата	0,18	0,1	0,02	0,03
Стекловолоконная вата	0,07	0,05	0,03	0,02
Всего минераловатных ТИМ	0,26	0,15	0,05	0,05
Всего ТИМ	0,33	0,22	0,07	0,08

Таблица 3
Table 3

Сравнительная характеристика рынков ССС России и стран Центральной Азии
Comparative characteristics of dry building mixtures markets in Russia and Central Asia

Показатели	Страны				
	Россия	Казахстан	Узбекистан	Кыргызстан	Таджикистан
Емкость рынка ССС, тыс. т (2022, оценка)	11572	1425	526	160	46
Подушевое потребление, кг/чел. в год (2022)	79	75	15	24	5
Средний темп прироста рынка, % (2019–2022)	3,6	10,7	17,8	0,4	48
Доля импорта, % (2022)	<1	14	2	43	55
Доля гипсовых ССС, % (2021)	46	61	66	36	20–25
Концентрация рынка (CR3, %, 2021)	28	55	68	25	н/д



ральной ваты: керамзит, перлит, вермикулит и изделия на их основе (в том числе штукатурки теплоизоляционные), теплоизоляционные жидкие керамические покрытия, звукоизоляционные панели из картона и кварцевого песка, кремневермикулитовые теплоизоляционные плиты, шамотно-стекловолоконные плиты, а также вспененный полистирол, эковату целлюлозную и изоляцию для труб из пенополиуретана.

Непосредственно по каменной вате ожидания потребления по 2023 г. весьма оптимистичны: 30,5 млн м³ (+5% к 2022 г.), при этом доля экспорта составит всего 4%.

Потребление стекловаты (кварцевой ваты) сохранится на уровне примерно 11 млн м³ (+1% к 2022 г.). Доля экспорта выше, чем каменной ваты, — 12%.

Динамика роста потребления экструдированного пенополистирола (ЭППС) замедляется со 145% в 2020 г. до 2% в 2023 г., хотя в натуральном выражении потребление ЭППС растет — в 2023 г. ожидается 7,82 млн м³. Доля импорта в структуре потребления около 5%.

Следует отметить, что рынок ЭППС также высококонцентрированный. По сути, его делят два гиганта — ТехноНиколь и Пеноплэкс с долями 48 и 42% соответственно.

Рынок вспененного (шарикового) пенополистирола (ППС) относительно стабилен и составляет 4,9–5,1 млн м³. На рынке представлена продукция более 100 производителей, экспорт <1% от выпуска, импорт <1% от потребления.

В совокупном выпуске теплоизоляции первую позицию на рынке занимает компания ТехноНиколь с долей рынка 31%.

Оптимистичный и пессимистичный прогнозы выпуска минеральной ваты на ближайшую пятилетку стабиль-

ные — 30,6–32,8 млн м³. Доли технической изоляции, плит для сэндвич-панелей, плит для вентфасадов будут увеличиваться.

Фасадным системам были посвящены два доклада: **Михаила Александрии**, возглавляющего Ассоциацию АНФАС, и Натальи Скороходовой.

Фасадные системы (скрепленные и навесные) являются значительным «потребителем» теплоизоляции и ряда компонентов, в том числе ССС или готовых шпаклевок, лакокрасочных материалов.

По прогнозу, в 2023 г. в России будет установлено 57,7 млн м² фасадных систем теплоизоляции, что на 2% больше, чем в 2022 г., из них 56% так называемые мокрые фасады (СФТК). В стоимостном выражении это составит порядка 168,3 млрд р. (42% СФТК).

Ольга Патенкова, коммерческий директор нижегородской компании Holzerfarbe — производителя лакокрасочных материалов и продуктов для систем утепления фасадов, считает, что рынок ЛКМ успешно преодолел период турбулентности, возникший в период пандемии и начала СВО. Уже несколько лет емкость рынка водно-дисперсионных ЛКМ колеблется в диапазоне 760–930 тыс. т. А вот цены в этот период поднимались существенно.

Несмотря на то что практически все подстроились под новую «сырьевую реальность», определились с тем, как и в каком качестве они продолжают работу на территории РФ, импортные марки продолжают ощущать некоторую напряженность. В связи со сложностями поставок европейского сырья остаются проблемы с производством продуктов в «высоком» ценовом сегменте.

На колебание рынка фасадных красок негативно влияет дефицит утеплителя, перебои с поставками ССС в пик сезона. Общее оживление на строительном рынке во второй половине 2023 г. позволило рынку ЛКМ выйти в положительную динамику роста объема потребления.

За счет продолжающегося снижения импорта объем производства в РФ растет более высокими темпами по сравнению с потреблением. В борьбе за увеличение своей доли рынка в период его передела многие производители проводят агрессивные ценовые акции (особенно в начале года).

В структуре ВД ЛКМ преобладают краски — 41%, грунтовки занимают 28%, шпаклевки — 16%.

Подробные отчеты об исследованиях различных сегментов рынка теплоизоляционных и отделочных материалов, рассмотренных на конференции, можно приобрести непосредственно в компании «Строительная информация».



Даешь керамзит в конструкции от фундамента до крыши!

6–7 сентября 2023 г. в Самаре прошла XIV ежегодная научно-практическая конференция «Керамзитобетон в современном строительстве: все виды строительных конструкций от фундамента до плит покрытий». Организаторами традиционно выступили НИИКерамзит и Союз производителей керамзита и керамзитобетона (НО «СПКиК»). Журналы издательства «Стройматериалы» – «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство» выступают постоянными информационными партнерами мероприятия.

В работе конференции приняли участие более сорока руководителей и ведущих специалистов керамзитовых заводов из России, Белоруссии и Казахстана, представители машиностроительных организаций, ученые отраслевых НИИ и вузов. Было заслушано порядка 15 докладов и сообщений. В рамках конференции состоялось собрание НО «СПКиК».

Участников конференции приветствовала **С.В. Демьянова**, директор Ассоциации «СРО «СредВолгСтрой». Она отметила, что керамзитобетон – традиционный, надежный, зарекомендовавший себя годами безотказной эксплуатации материал. Самарские строители с удовольствием его используют при любой возможности отказаться от многослойных конструкций. Однако, подчеркнула Светлана Владимировна, необходимо расширять работу по активной пропаганде материала на основе новых научных исследований. Инерция строительного рынка высока. Многослойные конструкции на начальном этапе внедрялись с трудом, но со временем стали рутинной. Теперь предстоит перодолеть обратное сопротивление, возвращая керамзитобетон в массовое строительство.

Основные доклады были посвящены опыту применения керамзита и керамзитобетона в различных конструкциях в разных регионах России.

И.В. Недосеко, д-р техн. наук, УГНТУ, много лет сотрудничает с Уфимской гипсовой компанией, выпускающей крупнопористый конструкционно-теплоизоляционный и особо легкий керамзитобетон. Он рассказал об опыте длительной (более 20 лет) эксплуатации зданий, где керамзит был применен в колодевой кладке стен и для утепления чердачных пространств.

Ю.Ф. Панченко, канд. техн. наук, зам. генерального директора по науке и развитию ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия», представила продукцию своего предприятия и показала варианты ее применения в монолитных конструкциях фундаментов и перекрытий. Наряду со снижением массы конструкций керамзитобетон имеет высокие показатели индекса изоляции воздушного шума.

Как всегда обстоятельным и научно подкрепленным был доклад **М.Г. Лазарашвили**, директора ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» из Белоруссии. Он показал сравнение двух вариантов определения коэффициента теплопроводности кладки из щелевых пазогребневых крупнопористых керамзитобетонных блоков ТермоКомфорт. Выпускаемые предприятием блоки обладают высокими теплотехническими свойствами, однако при определении коэффициента теплопроводности расчетным методом и на климатическом стенде показатели могут отличаться до 20%. Сделан вывод, что целесообразно использовать методику определения теплотехнических характеристик, максимально приближенную к естественным условиям эксплуатации, не только для сложных конструкций керамзитобетонных блоков, но и для других видов стеновых материалов с целью получения сопоставимых величин.

В.Н. Строцкий, ведущий научный сотрудник лаборатории легких и ячеистых бетонов и конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», рассказал об опыте применения высокопрочного конструкционного легкого бетона в строительстве высотных зданий. Например, в Москве в административном 25-этажном здании «Gazoil Plaza» высотой 96 м конструкции несущих стен, колонны и перекрытия пролетом 8 м выполнены из конструкционного самоуплотняющегося керамзитобетона марки по плотности D1800 и фактическими значениями классов по прочности при сжатии Вф45-Вф50.

Ряд докладов были посвящены использованию некондиционного сырья – кремнистых пород, а также производству альтернативных легких заполнителей бетона – пеностеклогранулята, пеностеклокерамики.

Участники конференции согласились, что дополнительно убеждать производителей в целесообразности широкого использования керамзита не нужно, и выразили пожелание, чтобы в будущем приглашать больше представителей строительных и проектных организаций, а также выезжать на знаковые объекты, построенные с использованием керамзитобетона.



Н.В. ЛЮБОМИРСКИЙ, д-р техн. наук (niklub.rk@mail.ru),
А.С. БАХТИН, канд. техн. наук (aleserba@mail.ru),
Т.А. БАХТИНА, канд. техн. наук (t.bakhtina83@gmail.com),
В.В. НИКОЛАЕНКО, инженер (v1told@mail.ru),
Г.Р. БИЛЕНКО, инженер (ger-bilenko@ya.ru)

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, 4)

Металлургические отходы как сырьевой резерв для достижения углеродной нейтральности стройиндустрии. Часть 1. Способность металлургических отходов связывать CO₂

Решение глобальных экологических проблем состоит в снижении техногенного воздействия на окружающую среду за счет утилизации выбросов углекислого газа и использования отходов промышленности для получения новых материалов и изделий. Рассмотрены техногенные отходы металлургической промышленности как сырье для производства строительных материалов и изделий, обладающее способностью к связыванию газообразного CO₂. Проведен анализ и выбор отходов металлургических предприятий, расположенных в Центральном и Северо-Западном федеральных округах Российской Федерации. Представлены результаты исследований экологичности, химического, вещественного и фазово-минералогического составов техногенных отходов металлургии, их гидратационной активности и способности к связыванию углекислого газа. Показано, что наиболее перспективным сырьем для производства строительных материалов и изделий являются шлаки сталеплавильных производств и нефелиновый шлам от переработки глиноземного сырья. Наибольшей способностью поглощать и связывать CO₂ отличаются нефелиновый шлам (до 12% CO₂ от массы шлама), сталеплавильные (конвертерные и электросталеплавильные) шлаки (до 8,8 и 9,2% CO₂ от массы шлака соответственно). Прочность при сжатии опытных образцов на данных видах шлаков зависит от степени их карбонизации и достигает значений 100 МПа и более после 6 ч принудительной карбонизации. Сделан вывод, что материал, полученный из техногенных металлургических отходов по технологии карбонизационного твердения, может применяться в качестве матричной субстанции для различных строительных материалов и изделий.

Ключевые слова: техногенные отходы, металлургические шлаки, металлургические шламы, карбонатное твердение, принудительная карбонизация, углекислый газ, связывание CO₂.

Авторы выражают благодарность ООО «Газпромнефть – Промышленные инновации» и ООО «Инжиниринговый химико-технологический центр» (Томск) за организационное содействие и техническую поддержку в отборе проб техногенных отходов металлургических предприятий и проведении исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «Газпромнефть – Промышленные инновации» в рамках договора на выполнение НИОКР № ГПИ-22/08000/00020/Р от 15.02.2022 г.

Для цитирования: Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Бахтина Т.А., Николаенко В.В., Биленко Г.Р. Металлургические отходы как сырьевой резерв для достижения углеродной нейтральности стройиндустрии. Часть 1. Способность металлургических отходов связывать CO₂ // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 80–94. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-80-94>

N.V. LJUBOMIRSKIJ, Doctor of Sciences (Engineering) (niklub.rk@mail.ru),

A.S. BAHTIN, Candidate of Sciences (Engineering) (aleserba@mail.ru),

T.A. BAHTINA, Candidate of Sciences (Engineering) (t.bakhtina83@gmail.com),

V.V. NIKOLAENKO, Engineer (v1told@mail.ru),

G.R. BILENKO, Engineer (ger-bilenko@ya.ru)

V.I. Vernadsky Crimean Federal University (4, Academician Vernadskiy Avenue, Simferopol, 295007, Republic of Crimea, Russian Federation)

Metallurgical Waste as a Raw Material Reserve for Achieving Carbon Neutrality of the Construction Industry. Part 1. Ability of Metallurgical Waste to Bind CO₂

The solution to global environmental problems is to reduce the anthropogenic impact on the environment through the utilization of carbon dioxide emissions and the use of industrial waste to produce new materials and products. Technogenic wastes of the metallurgical industry are considered as raw materials for the production of building materials and products with the ability to bind gaseous CO₂. The analysis and selection of waste from metallurgical enterprises located in the Central and North-Western Federal Districts of the Russian Federation is carried out. The results of studies of environmental friendliness, chemical, material and phase-mineralogical compositions of technogenic metallurgy waste, their hydration activity and ability to bind carbon dioxide are presented. It is shown that the most promising raw materials for the production of building materials and products are steelmaking slags and nepheline sludge from the processing of alumina raw materials. The greatest ability to absorb and bind CO₂ is distinguished by nepheline sludge (up to 12% CO₂ by weight of sludge), steelmaking (converter and electric steelmaking) slags (up to 8.8 and 9.2% CO₂ by weight of slag, respectively). The compressive strength of the prototypes on these types of slags depends on the degree of their carbonation and reaches values of 100 MPa or more after 6 hours of forced carbonation. It is concluded that the material obtained from man-made metallurgical waste by carbonation hardening technology can be used as a matrix substance for various building materials and products.

Keywords: technogenic waste, metallurgical slags, metallurgical sludge, carbonate hardening, forced carbonation, carbon dioxide, CO₂ binding.

The authors express their gratitude to Gazpromneft – Industrial Innovations LLC and Engineering Chemical Technology Center LLC (Tomsk) for organizational assistance and technical support in sampling man-made waste from metallurgical enterprises and conducting research.

The works were carried out with the financial support of Gazpromneft – Industrial Innovations LLC under the R&D contract No. GPI-22/08000/00020/P dated 02/15/2022.

For citation: Ljubomirskij N.V., Bahtin A.S., Bahtina T.A., Nikolaenko V.V., Engineer, Bilenko G.R. Metallurgical waste as a raw material reserve for achieving carbon neutrality of the construction industry. Part 1. Ability of metallurgical waste to bind CO₂. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 80–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-80-94>

Повсеместное признание климатических изменений, а также введение ряда ограничений, связанных с эмиссией парниковых газов, вынуждает промышленников искать способы уменьшения углеродного следа своих производств. Технологии улавливания CO₂ из потоков дымовых газов довольно хорошо отработаны и являются частью некоторых промышленных процессов и коммерчески доступны уже несколько десятилетий [1, 2]. Это технологии улавливания диоксида углерода, основанные на абсорбции и адсорбции CO₂, разделение газа на мембране, криогенная перегонка, сжигание в химическом цикле и биологическое разделение с использованием бактерий или водорослей [3–6]. По данным [2] по состоянию на 2019

г., в мире реализовано 17 проектов с технологией улавливания и хранения диоксида углерода, ежегодно улавливающих порядка 31,5 Мт CO₂, из которых около 3,7 Мт захораниваются в подземных хранилищах геологических формаций, при том что ежегодная эмиссия CO₂ только от энергообъектов, по данным доклада Международного энергетического агентства (IEA) за 2022 г. [7], составляет более 36,8 Гт.

Углекислый газ в основном используется в технологиях карбонизации полимеров [8], в пищевой промышленности, для ведения сварочных работ. При этом требуется CO₂ высокой степени очистки. Отсутствие развитой инфраструктуры и связанная с этим низкая рентабельность транспортирования и захоронения CO₂ тормозят широкое внедрение технологий по улавливанию CO₂ на промышленных предприятиях. Поэтому важнейшей стратегией в снижении углеродного следа является разработка эффективных методов использования углекислого газа в качестве сырья для продукции массового потребления, причем используемый CO₂ может быть невысоких степеней очистки и концентраций с минимальной подготовкой. Эти требования вполне удовлетворяются при производстве строительных материалов и изделий, твердение которых обеспечивается за счет химических реакций карбонизации – так называемого карбонатного твердения.

Перспективным сырьем, обладающим способностью к связыванию газообразного CO₂, являются различные техногенные отходы металлургии (ТОМ) – шлаки и шламы. В табл. 1 приведены химические составы шлаков и шламов металлургических предприятий Российской Федерации, составленные по данным из открытых источников информации (Интернет), которые свидетельствуют о значительном потенциале данных отходов к реакции карбонизации и связыванию газообразного CO₂. Содержание CaO и MgO – наиболее реакционноспособных соединений к взаимодействию с CO₂ в представленных техногенных отходах составляет от 34 до

Таблица 1
Table 1

Средний химический состав техногенных отходов металлургии предприятий Российской Федерации
Average chemical composition of technogenic waste of metallurgy of enterprises of the Russian Federation

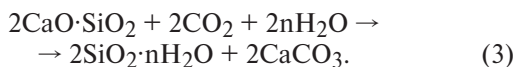
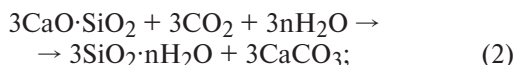
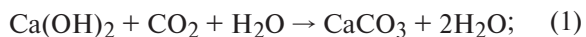
Содержание в пересчете на оксиды, мас. %						Модуль основности (M ₀)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	FeO + Fe ₂ O ₃	
Доменные шлаки						
31,5–39,8	9–15,8	31,5–41,9	0,3–7,66	0,6–1,2	0,5–1	0,71–0,93
Сталеплавильные шлаки:						
шлаки мартеновские						
15–25	2–9	28–53	6–18	–	10–25	2–2,08
шлаки конвертерные						
7–18	2–6	40–55	6–10	–	12–28	2,71–5,11
шлаки электросталеплавильные и внепечной обработки стали						
17–22	2–9	35–60	11–17	–	3–20	2,32–2,48
Ферросплавные шлаки, образующиеся при производстве:						
ферромарганца						
29,62	10,5	40,32	0,35	–	0,42	1,01
феррохрома						
28,2	5,4	49,47	10,43	–	5,21	1,78
феррованадия						
42,9	2,96	45,44	3,18	0,36	0,58	1,06
ферросилиция						
42,1	20,3	28,2	0,33	0,6	0,6	0,46
Нефелиновые шламы, образующиеся при переработке минерального сырья на глиноземе						
27,73	3,24	63,41	0,72	–	2,51	2,07
Примечание. Модуль основности (M ₀) техногенных отходов представляет собой соотношение содержащихся в них суммы оксидов Ca и Mg к сумме оксидов Si и Al (мас. %): M ₀ = (CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃) [9].						

77%. Наибольшим содержанием оксидов кальция и магния отличаются шлаки и шламы сталеплавильных производств.

В настоящее время основным способом переработки доменных шлаков является грануляция. Измельченный гранулированный доменный шлак является одной из наиболее часто используемых добавок для цемента, и его положительное влияние на бетон хорошо известно [10]. Обладая высокой реакционной способностью, он является активным материалом для связывания CO_2 [11]. Так, ряд исследований показывают [12, 13], что скорость карбонизации смешанных цементов возрастает с увеличением содержания измельченного гранулированного доменного шлака.

Немногочисленные исследования принудительной карбонизации доменных шлаков показывают значительную эффективность этого процесса. Экспериментально установлено [14], что при прямой газо-твердой карбонизации доменных шлаков в закрытой камере в течение 28 сут доля кальция в шлаке, перешедшего в карбонаты, достигает порядка 39%. Модификация измельченных гранулированных шлаков растворами гидроксида натрия и солей [15], а также создание специальных условий (повышенная температура, давление CO_2) для ускоренной карбонизации [16–18] позволяют повысить эффективность процесса примерно в 10 раз, достигая показателя минерализации CO_2 в течение 24 ч порядка 280 кг CO_2 на тонну доменных шлаков.

По сравнению с доменными гранулированными сталеплавильные шлаки более подходят для карбонизации минералов благодаря повышенной основности, наличию свободного CaO и различных кристаллических силикатно-кальциевых фаз: Ca_3SiO_5 (C_3S), $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ($\beta\text{-C}_2\text{S}$), $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ($\gamma\text{-C}_2\text{S}$) [19]. Основные химические реакции во время карбонизации описываются уравнениями [20–23]:



Большая часть исследований в области карбонизации металлургических шлаков, проводимых в мире, посвящена изучению их фазовых и структурных трансформаций. Более всего исследованы шлаки, образующиеся при выплавке сталей [24, 25] и ферросплавов [26–28]. Все исследователи отмечают, что карбонизация приводит к снижению содержания $\beta\text{-C}_2\text{S}$ и $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, C_3S и увеличению концентрации различных карбонатных новообразований. С одной стороны, отверждение карбонизацией является идеальным методом для безопасного изолирования и хранения CO_2 [29, 30] в виде термохимически стабильного продукта – CaCO_3 , с другой стороны, продукт реакции заполняет поры и улучшает механиче-

ские характеристики и долговечность материала [31, 32]. По данным [33, 34], вяжущее из ковшового шлака после 24-часовой карбонизации может достичь прочности при сжатии 26,7 МПа. В работе [35] из сталеплавильного шлака после 2 ч карбонизации при постоянной температуре 80°C и давлении CO_2 2 МПа были получены строительные блоки с прочностью при сжатии до 50 МПа. На основе сталеплавильного шлака были получены опытные образцы листов размером 76×127×12 мм [36], прочность при сжатии и на растяжение при изгибе которых составила 13,75 и 6,33 МПа соответственно.

Широких исследований карбонизации нефелинового шлама, минералогический состав которого на 80% состоит из $\beta\text{-C}_2\text{S}$ (белита), в настоящее время не проводится, однако многими зарубежными учеными, изучавшими механизмы карбонатного твердения систем на основе цемента [37–41], установлено, что цементы с повышенным содержанием белита более активно поглощают углекислый газ с образованием стабильного карбоната кальция, чем алитовые цементы.

Однако, несмотря на положительные результаты научных исследований, полученные мировым научным сообществом в области искусственной карбонизации металлургических шлаков, технологии утилизации шлаков в строительные материалы и изделия принудительного карбонатного твердения на сегодняшний день практически не реализованы из-за отсутствия научно-технологических основ процессов искусственной карбонизации систем на основе ТОМ.

Согласно данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, только в отвалах предприятий черной и цветной металлургии количество твердых шлаков превышает 500 млн т. По данным «Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2020 гг.» [42], по итогам 2020 г. в Российской Федерации при производстве только портландцемента и извести пришлось порядка 29,3 млн т выбросов газообразного CO_2 . Всестороннее исследование отходов металлургической отрасли на предмет связывания CO_2 и формирования в результате карбонизации искусственного камня прочной и стабильной структуры позволит разработать оптимальные технологические параметры переработки шлаков и получения на их основе строительных материалов и изделий с требуемыми свойствами.

Настоящей публикацией авторы открывают цикл статей, посвященных разработке научно-технологических основ утилизации газообразного диоксида углерода и техногенных отходов металлургических предприятий в строительные материалы и изделия принудительного карбонатного твердения. Обозначенное направление является новым, предопределяет всестороннее исследование различных металлургических отходов по их реакционной способности и активности к связыванию техногенного угле-

кислого газа, установление механизмов принудительной карбонизации систем на основе ТОМ и закономерностей формирования новообразованной карбонатной структуры и свойств получаемого материала. Все перечисленные направления исследований позволят получить новые знания в области принудительной карбонизации сложных систем, коими являются техногенные отходы металлургии, и разработать технологии производства различных по назначению строительных материалов и изделий принудительного карбонатного твердения.

Сложность и многоплановость проблемы получения новых материалов и управления их качеством предопределяют использование системного подхода как к объекту исследования, так и к самому процессу научного исследования. В этой связи выбрана методика исследований, состоящая из следующих основных блоков:

– основываясь на результатах предварительного анализа (табл. 1), осуществить выбор техногенных отходов металлургических предприятий РФ;

– подготовить образцы из проб ТОМ для исследований;

– установить экологичность, вещественный и химико-минералогический составы ТОМ;

– исследовать гидратационную активность и способность образцов техногенного сырья связывать CO_2 .

В качестве материалов исследований представлены шлаки и шламы металлургических предприятий, расположенных в Центральном и Северо-Западном федеральных округах РФ:

– доменный шлак публичного акционерного общества «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК», Липецк) гранулированный и отвалный в виде отсева (фр. 0–5 мм) и щебня фр. 5–20, 20–40, 40–70 и 70–120 мм;

– шлаки Череповецкого металлургического комбината публичного акционерного общества «Северсталь» (ЧерМК ПАО «Северсталь», г. Череповец, Вологодская область) доменные в виде щебня различных фракций крупностью от 5 до 70 мм и несортированного (фр. 0–400 мм); сталеплавильные в виде щебня фракций 40–120 мм и несортированного (фр. 0–100 мм), а также шлам конвертерный;

– электросталеплавильный шлак АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова» ООО УК «Металлоинвест» (АО «ОЭМК им. А.А. Угарова», г. Старый Оскол, Белгородская область) в виде отсева (фр. 0–20 мм) и щебня (фр. 5–20, 20–200 мм);

– шлак ферросплавного производства ООО «Тихвинский ферросплавный завод» холдинга YILMADEN (ООО «ТФЗ», г. Тихвин, Ленинградская область) в виде отсева (фр. 0–5 мм) и щебня (фр. 20–40 мм);

– нефелиновый шлам общества с ограниченной ответственностью «Пикалёвский глинозёмный завод» (ООО «ПГЛЗ», г. Пикалёво, Ленинградская область). Далее по тексту – НЛМК, ЧерМК, ОЭМК, ТФЗ, ПГЛЗ соответственно.

В качестве источника углекислого газа в лабораторных исследованиях использовался диоксид углерода высокого давления в баллонах.

Подготовка образцов из проб ТОМ для дальнейших исследований заключалась в измельчении проб техногенных отходов и получения порошков шлаков и шламов с удельной поверхностью от 260 до 310 $\text{м}^2/\text{кг}$.

Экологичность техногенных отходов устанавливалась путем определения удельной эффективной активности естественных радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$): тория-232, радия-226, калия-40 методом гамма-спектрометрического анализа и сравнения полученных результатов с требованиями ГОСТ 30108–94.

Комплекс физико-химических исследований исходных проб и образцов техногенных отходов включал определение истинной плотности материала, химического и фазово-минералогического составов, показателя удельной поверхности, размера и распределения частиц в измельченном материале.

Исследование химического состава проб шлаков и шламов проводили методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии на спектрометре рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном Epsilon 3XLE, PANanalytical B.V., позволяющем определять концентрацию элементов в диапазоне от долей ppm до 100 мас. %. Обработка получаемых в результате анализа спектров каждого элемента методами математических зависимостей и статистики позволяла проводить количественный анализ химического состава проб ТОМ в виде оксидов определяемых элементов. Фазово-минералогический состав определяли с помощью рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре Rigaku «Ultima IV» (корундовые числа для всех фаз, полученных при качественном рентгенофазовом анализе, определялись из данных базы PDF2), а также термогравиметрического анализа на синхронном (ТГА/ДСК/ДТА) анализаторе STA 8000, Perkin Elmer. Истинную плотность материала проб ТОМ определяли методом газовой пикнометрии в автоматическом пикнометре газовом Rusnomatic ATC, Thermo Fisher Scientific. Контроль удельной поверхности производился методом воздухопроницаемости на автоматическом аппарате Блейна Testing 1.0297E; размер и распределение частиц в измельченном материале определялся методом лазерной дифракции на лазерном дифракционном анализаторе гранулометрического состава частиц Partica LA-960, HORIBA.

Оценка вещественного состава заключалась в определении модуля основности (МО) [9], коэффициента основности (КО), склонности ТОМ к силикатному распаду и производилась расчетным способом по формулам [43].

Методика установления пригодности ТОМ для производства строительных материалов и изделий принудительного карбонатного твердения заключалась в исследовании их способности гидратации и связывания углекислого газа.

Исследование способности к реакциям гидратации проводили на образцах-порошках путем затво-

рения их водой до получения пластичного теста и выдерживания полученных образцов теста в течение 1, 3, 6 и 24 ч в закрытых емкостях, исключающих высыхание. По истечении установленного времени выдерживания образцы теста высушивали до постоянной массы и подвергали дифференциально-термическому (ДТА) и термогравиметрическому (ТГА) анализам для определения количества химически связанной воды в составе гидратных новообразований. Образцы-порошки получали помолотом техногенных отходов в шаровой лабораторной мельнице (ШЛМ-100). Время измельчения до заданной удельной поверхности проб шлаков НЛМК, ЧерМК и ТФЗ составило 180 мин, проб шлака ОЭМК – 120 мин, нефелинового шлама ПГЛЗ – 60 мин.

Способность техногенного сырья к связыванию CO₂ определяли на опытных образцах из ТОМ с различной степенью плотности начальной структуры при выдерживании их в газовой среде с повышенной концентрацией CO₂. Опытные образцы представляли собой цилиндры диаметром 30 мм, изготовленные из смеси порошков ТОМ с водой методом полусухого прессования в металлических пресс-формах при удельном давлении прессования 10, 20 и 30 МПа. Отношение диаметра к высоте выдерживалось ≈1. Всего изготавливалось по шесть образцов-цилиндров при каждом давлении прессования. Три образца подвергались принудительной карбонизации, другие три образца хранились в нормальных температурно-влажностных условиях под крышкой в эксикаторе. Влажность формовочной смеси на каждом виде техногенного сырья подбирали такой, при которой обеспечивались целостность образцов при извлечении их из формы и возможность дальнейшей работы с ними.

Карбонизацию опытных образцов проводили в автоматической карбонизационной камере в газовой среде с концентрацией CO₂ порядка 80% об. при нормальном давлении и температуре в течение 6 ч.

Опытные образцы, подвергнутые карбонизации, и после хранения в нормальных температурно-влажностных условиях под крышкой в эксикаторе осматривали на наличие дефектов, измеряли, взвешивали и высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 90°. После сушки образцы-цилиндры также подвергали осмотру, после чего определяли их остаточную влажность, истинную и среднюю плотности, прочность при сжатии и глубину карбонизации (толщину карбонизированного слоя) нанесением раствора фенолфталеина на внутренний скол образцов.

После испытаний прочности при сжатии карбонизированных образцов полученный материал аккуратно разделялся на материал наружного и внутреннего слоев. Из отобранного материала формировались две средние пробы для проведения исследований по определению вида и количества карбонатных новообразований методами РФА, ДТА и ТГА.

Количество поглощенного образцами CO₂ в % на единицу массы техногенного отхода W_{CO₂} определяли для каждого отдельного образца по формуле:

$$W_{CO_2} = \left(\frac{m_{карб} - m_{H_2O}^{cb}}{m_{т.о}^{сух}} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где m_{карб} – масса сухого карбонизированного образца, г; m_{т.о}^{сух} – масса сухого порошка техногенного отхода в образце, г; m_{H₂O}^{cb} – масса образца с учетом химически связанной воды в результате гидратации материала образца, г:

$$m_{H_2O}^{cb} = m_{т.о}^{сух} \cdot \frac{W_{x.cb}}{100\%}, \quad (5)$$

где W_{x.cb} – количество химически связанной воды в образце, %, определяемое по формуле:

$$W_{x.cb} = \left(\frac{m_{норм.тв}^{сух} - m_{т.о}^{сух}}{m_{т.о}^{сух}} \right) \cdot 100\%, \quad (6)$$

где m_{норм.тв}^{сух} – масса образца нормального твердения после сушки, г.

Перечень исследуемых ТОМ, а также результаты их предварительного анализа приведены в табл. 2. Содержание металлических примесей определяли на мелкозернистых образцах ТОМ магнитом по ГОСТ 32861–2014.

Плотность вещества шлаков отличается в зависимости от вида и способа их образования. Меньшей

Таблица 2
Table 2

Исследуемые пробы техногенных отходов металлургических предприятий
The studied samples of technogenic waste of metallurgical enterprises

Наименование предприятия образования отходов	Вид отхода	Шифр пробы	Истинная плотность ρ, кг/м ³	Содержание примесей металла, мас. %
НЛМК	Доменный шлак отвальный	НМЛК-ДО	2984	0,4
		НМЛК-ДЦ		
	Доменный шлак гранулированный	НМЛК-Г	2924	0,3
ТФЗ	Шлак феррохромного производства отвальный	ТФЗ-О	3383	33,6
		ТФЗ-Щ		
ЧерМК	Доменный шлак гранулированный	ЧМК-Г	2889	0,5
	Доменный шлак отвальный	ЧМК-Д	2913	0,5
	Сталеплавильный	ЧМК-С	3611	26,8
	Конвертерный шлак	ЧМК-КШ	3372	35,8
ОЭМК	Электросталеплавильный шлак	ОЭМК-О	3017	9,4
		ОЭМК-Щ		
ПГЛЗ	Нефелиновый шлак	ПГЛЗ	3155	0,2

**Таблица 3
Table 3**

**Результаты определения удельной эффективной активности естественных радионуклидов
исследуемых техногенных отходов
Results of determining the specific effective activity of natural radionuclides
of the studied technogenic waste**

Шифр пробы		Показатели, Бк/кг				Соответствие/несоответствие требованиям ГОСТ 5578–2019
		Удельная активность радия-226	Удельная активность тория-232	Удельная активность калия-40	Удельная эффективная активность ЕРН	
НЛМК-	ДО	57,8	33,9	149,8	115	Соответствует
	ДЦ	54,5	33,7	155	112,1	Соответствует
ТФЗ-	О	28,9	Менее 10	Менее 40	39,7	Соответствует
	Щ					
ЧМК-	Г	74,7	32,7	176,1	131,9	Соответствует
	Д	66,6	26,9	126,6	112	Соответствует
	С	9	Менее 10	Менее 40	9,1	Соответствует
	КШ	9,8	Менее 10	Менее 40	11,4	Соответствует
ОЭМК-	О	49,4	31,8	Менее 40	91	Соответствует
	Щ	48	29,9	Менее 40	86,7	Соответствует
ПГЛЗ		40,7	Менее 10	200,6	73,2	Соответствует

**Таблица 4
Table 4**

**Химический состав исследуемых проб ТОМ, %
Chemical composition of the studied samples of technogenic waste of metallurgy, %**

Компонент	Шифр пробы											
	НЛМК-			ТФЗ-		ЧМК-				ОЭМК-		ПГЛЗ
	ДО	ДЦ	Г	О	Щ	Г	Д	С	КШ	О	Щ	
SiO ₂	28,65	33,45	28,19	32,6	33,06	30,82	34,09	20,22	9,11	25,63	23,89	28,79
Al ₂ O ₃	6,08	7,36	6,24	14,43	13,89	9,19	8,74	5,44	2,9	5,29	4,6	3,77
CaO	53,32	47,81	55,51	1,45	1,48	44,41	44,82	45,88	52,07	41,48	42,87	62,07
MgO	5,03	6,42	5,89	41,06	43,77	9,02	7,72	5,38	4,17	8,76	13,8	1,27
SO ₃	3,3	2,59	1,89	0,37	0,36	1,2	1,41	0,76	0,49	0,23	0,32	-
Fe ₂ O ₃	1,34	0,49	0,9	1,37	0,84	0,58	0,44	17,65	26,25	16,82	13	2,45
MnO	0,4	0,24	0,53	0,21	0,19	0,61	0,56	2,22	2,95	0,77	0,66	0,08
TiO ₂	0,59	0,5	0,53	0,37	0,35	3,13	1,36	1,07	0,64	0,31	0,23	0,32
K ₂ O	0,85	0,84	0,9	0,07	-	0,69	0,57	0,3	0,1	0,09	0,06	0,86
SrO	0,19	0,12	0,21	-	-	0,14	0,11	0,08	0,05	0,15	0,15	0,28
Cr ₂ O ₃	-	0,02	-	8,05	6,01	0,05	-	0,34	0,4	0,37	0,3	-
BaO	0,14	0,09	0,17	-	-	0,09	0,07	0,05	-	0,02	0,02	0,06
V ₂ O ₅	-	-	0,01	0,01	-	-	0,02	0,44	0,61	0,04	0,03	-
ZrO ₂	-	0,04	-	-	-	0,07	0,05	0,02	-	-	-	0,03
Cl	-	-	0,03	-	-	-	-	0,05	0,18	0,04	0,04	0,01
SnO ₂	-	0,03	-	-	-	-	0,04	0,04	-	-	0,03	-
Nb ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	0,04	0,06	-	-	-
WO ₃	-	-	-	-	-	-	-	0,02	-	-	-	-
TeO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02	-	-	-
NiO	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ	99,89	100	99,11	100	99,95	100	100	100	100	100	100	99,99

**Таблица 5
Table 5**

**Расчетные значения коэффициента и модуля основности техногенных отходов
Calculated values of the coefficient and modulus of basicity of technogenic waste**

Показатель	Шифр пробы											ПГЛЗ
	НЛМК-			ТФЗ-		ЧМК-				ОЭМК-		
	ДО	ДЩ	Г	О	Щ	Г	Д	С	КШ	О	Щ	
K ₀	2,16	1,72	1,78	1,51	1,52	1,93	1,68	3,07	7,7	2,31	2,69	2,43
M ₀	1,68	1,33	2,4	0,9	0,96	1,34	1,23	2	4,68	1,62	1,99	1,95

**Таблица 6
Table 6**

**Расчет вероятности силикатного распада исследуемых ТОМ
Calculation of the probability of silicate decomposition of the studied technogenic waste of metallurgy**

Показатель	Шифр пробы											ПГЛЗ
	НЛМК-			ТФЗ-		ЧМК-				ОЭМК-		
	ДО	ДЩ	Г	О	Щ	Г	Д	С	КШ	О	Щ	
SiO ₂ факт	28,65	33,45	28,19	32,6	33,06	30,82	34,09	20,22	9,11	25,63	23,89	28,79
SiO ₂ min	32,83	32,5	33,84	13,61	13,84	30,09	31,56	26,44	24,47	26,84	26,7	36,35
Распад вероятен	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да	Да
CaO _{факт}	53,32	47,81	55,51	1,45	1,48	44,41	44,82	45,88	52,07	41,48	42,87	62,07
CaO _{max}	45,6	45,14	46,99	18,91	19,22	41,79	43,84	36,72	33,98	37,28	37,09	50,48
Распад вероятен	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Стойкие (+), нестойкие (-) к распаду	-	±	-	+	+	±	±	-	-	-	-	-

плотностью (от 2889 до 2984 кг/м³) обладают шлаки доменные, представленные пробами Новолипецкого и Череповецкого металлургических комбинатов. Наибольшей плотностью обладают шлаки сталеплавильных производств, образующихся на ЧерМК (ρ=3611 и 3372 кг/м³), и шлаки феррохромного производства ТФЗ (ρ=3383 кг/м³). Высокие значения плотности свидетельствуют о наличии в составе данных шлаков повышенного количества металлических примесей. Шлак электросталеплавильный ОЭМК отличается значительно меньшим содержанием металла в сравнении с другими рассматриваемыми шлаками сталеплавильных производств, соответственно обладает и более низкими значениями плотности (ρ=3017 кг/м³). Плотность нефелинового шлама ПГЛЗ составляет 3155 кг/м³ и близка к значениям плотности портландцементного клинкера.

Анализ результатов определения удельной эффективной активности естественных радионуклидов A_{эфф} (табл. 3) показывает, что все исследуемые пробы техногенных отходов соответствуют требованиям ГОСТ 5578–2019 «Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия», имея показатель A_{эфф} менее 370 Бк/кг.

В основе химического состава проб ТОМ в пересчете на оксиды, приведенного в табл. 4, – оксиды кальция, магния и кремния, а также алюминия и железа.

Отходы доменного производства (пробы НЛМК и ЧМК), помимо содержания в своем составе CaO + MgO (около 58 и 53% соответственно), SiO₂ (31 и 32,5%) и Al₂O₃ (6,6 и 9%), отличаются значительным содержанием примесей серы – до 3,3% в шлаках НЛМК и до 1,4% в шлаках ЧерМК. Следует отметить заметную разницу в содержании элементов в пробах шлака НЛМК в зависимости от вида получаемого при дроблении продукта. Так, отсев содержит большее количество Ca и Fe, чем в щебне, а щебень отличается от отсева большим содержанием Si, Al и Mg. Химический состав проб отсевов и щебней шлаков ТФЗ и ОЭМК отличается незначительно и имеет общую со шлаком НЛМК особенность – повышенное содержание Fe в отсевах.

В шлаках и шламах сталеплавильных производств содержание SO₃ составляет от 0,23 до 0,76%. Отходы сталеплавильных производств отличаются значительным содержанием Fe₂O₃: до 26,2 и 17,6% в пробах ЧМК-КШ и ЧМК-С соответственно. В электросталеплавильных шлаках ОЭМК содержание Fe₂O₃ несколько ниже и составляет в среднем 14,9%. Конвертерный шлам, помимо повышенного содержания Fe₂O₃ (более 26%), выделяется высоким содержанием CaO (около 52%), при этом содержание SiO₂ составляет всего 9,1%. Это позволяет предположить, что часть CaO находится в свободном состоянии. Кроме того, отходы сталеплавильных производств характеризуются повышенным содержанием

MnO: около 0,7% в пробах ОЭМК; 2,2 и 2,9% в пробах ЧМК-С и ЧМК-КШ соответственно.

Основу химического состава проб шлака феррохромного производства ТФЗ составляет MgO (в среднем 42,4%). Отличительной особенностью шлака является низкое содержание в его составе CaO (до 1,5%), а также наибольшее из всех исследуемых проб содержание Al₂O₃ (в среднем 14,2%) и Cr₂O₃ (в среднем 7%). Проба нефелинового шлака ПГЛЗ на 62,07% состоит из CaO и на 28,8% из SiO₂, что предопределяет силикатно-кальциевый минералогический состав. В качестве примесей все исследуемые пробы содержат TiO₂ и K₂O, а также SrO. Наибольшим количеством примесей различных металлов отличаются шлаки сталелитейных производств.

Анализ вещественного состава (табл. 5) показал, что исследуемые пробы техногенных отходов кроме пробы шлака феррохромного производства ТФЗ характеризуются показателями K_O>1,6 и M_O>1 и относятся к основным и ультраосновным [43]. Пробы шлака ТФЗ являются нейтральными. Наибольшими значениями коэффициента и модуля основности характеризуются отходы сталеплавильных комбинатов и производства глинозема, что указывает на возможность данных техногенных отходов вступать в химическую реакцию с CO₂.

Одним из показателей, объясняющим нестабильное состояние техногенных отходов и позволяющим судить о них как о сырье, способном к реакциям карбонизации, является склонность к силикатному распаду. Известно [41], что техногенные продукты являются стойкими к силикатному распаду, если SiO_{2min}<SiO_{2факт}, а CaO_{max}>CaO_{факт}. Результаты

Таблица 7
Table 7
Содержание основных фаз, составляющих минералогический состав исследуемых ТОМ, %
The content of the main phases that make up the mineralogical composition of the studied technogenic waste of metallurgy, %

Минерал	НЛМК-Д	ЧМК-Д	ТФЗ	ЧМК-С	ЧМК-КШ	ОЭМК	ПГЛЗ
Оккерманит (Ca ₂ Mg[Si ₂ O ₇])	57	75	6	60	-	-	-
Псевдоволластонит (α-CaSiO ₃)	12	-	-	-	-	-	-
Форстерит (Mg ₂ SiO ₄)	-	-	66	-	-	-	-
Шпинель (MgAl ₂ O ₄)	-	-	24	-	-	-	-
Шеннонит (γ-Ca ₂ SiO ₄)	4	-	-	24	-	11	-
Ларнит (β-Ca ₂ SiO ₄) (белит)	-	-	-	-	8	-	90
Сребродольскит (Ca ₂ Fe ₂ O ₅)	-	-	-	-	7	-	-
Геденбергит (CaFeSi ₂ O ₆)	-	-	-	-	-	9	-
Мервинит (Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂)	-	-	-	-	-	30	-
Фаялит (γ-Fe ₂ SiO ₄)	-	-	-	-	-	11	-
Кальцит (CaCO ₃)	-	-	-	-	15,2	-	-
CaO	-	-	-	-	12,5	-	-

расчета склонности к силикатному распаду (табл. 6) показывают, что из всех исследуемых техногенных отходов лишь шлаки феррохромные (проба ТФЗ) обладают стойкостью к силикатному распаду, т. е. представляют собой стабильный продукт. Доменные шлаки отличаются стойкостью к силикатному рас-

Таблица 8
Table 8

Химические уравнения реакции карбонизации минералов ТОМ по данным расчетов в FactSage
Chemical equations of carbonation reaction of minerals of technogenic waste of metallurgy according to calculations in FactSage

Минерал	Уравнение химической реакции карбонизации	ТОМ, в составе которого имеется данный минерал, шифр пробы	Значение термодинамических характеристик при температуре 298 К		
			ΔH, кДж/моль	ΔS, кДж/(моль·К)	ΔG, кДж/моль
Мервинит	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ + 4H ₂ O + 4CO ₂ → 3CaCO ₃ + MgCO ₃ + 2H ₄ SiO ₄	ОЭМК	-420,771	-0,672	-220,395
Ларнит	β-Ca ₂ SiO ₄ + 2H ₂ O + 2CO ₂ → 2CaCO ₃ + H ₄ SiO ₄	ЧМК-КШ, ПГЛЗ	-262,124	-0,347	-158,777
Оккерманит	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ + 4H ₂ O + 3CO ₂ → 2CaCO ₃ + MgCO ₃ + 2H ₄ SiO ₄	ТФЗ, НЛМК-Д, ЧМК-Д, ЧМК-С	-297,115	-0,507	-146,104
Шеннонит	γ-Ca ₂ SiO ₄ + 2H ₂ O + 2CO ₂ → 2CaCO ₃ + H ₄ SiO ₄	НЛМК-Д, ЧМК-С, ОЭМК	-228,24	-0,319	-133,275
Форстерит	Mg ₂ SiO ₄ + 2H ₂ O + 2CO ₂ → 2MgCO ₃ + H ₄ SiO ₄	ТФЗ	-168,101	-0,337	-67,587
Фаялит	Fe ₂ SiO ₄ + 2H ₂ O + 2CO ₂ → 2FeCO ₃ + H ₄ SiO ₄	ОЭМК	-162,854	-0,335	-62,972
Псевдоволластонит	CaSiO ₃ + 2H ₂ O + CO ₂ → CaCO ₃ + H ₄ SiO ₄	НЛМК-Д	-87,933	-0,153	-42,333
Шпинель	MgAl ₂ O ₄ + H ₂ O + CO ₂ → MgCO ₃ + Al ₂ O ₃ + H ₂ O	ТФЗ	-93,554	-0,182	-39,382
Геденбергит	CaFeSi ₂ O ₆ + 4H ₂ O + CO ₂ → CaCO ₃ + FeO + 2H ₄ SiO ₄	ОЭМК	-54,472	-0,132	-15,261

паду по содержанию SiO_2 , однако являются нестойкими по содержанию CaO . Отходы сталеплавильных производств и нефелиновый шлак находятся в нестабильном состоянии и склонны к структурным трансформациям за счет химических реакций.

Дальнейшие исследования проб ТОМ как потенциального сырья для производства строительных материалов и изделий принудительного карбонатного твердения проводили на объединенных пробах «отсев:щебень» в соотношении 35:65 (мас. %).

Важнейшей характеристикой, определяющей способность материалов вступать в химические взаимодействия, в том числе и карбонизироваться, является их фазово-минералогический состав. Минералогический состав исследуемых ТОМ различен, но характеризуется некоторой схожестью (табл. 7). Основной фазой, определяющей минералогический состав доменных шлаков, является окерманит, при этом в составе шлака ПАО «НЛМК» в отличие от пробы шлака ЧМК-Д содержатся такие фазы, как псевдоволластонит и шеннонит ($\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) – продукт силикатного распада ларнита ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$). Окерманит также составляет основу минералогического состава сталеплавильного шлака ЧМК. Общей особенностью сталеплавильных шлаков является содержание $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$. Электросталеплавильный шлак пробы ОЭМК отличается наиболее разнообразным минералогическим составом, в составе которого кроме шеннонита доминирует мервинит, а также в меньших количествах фаялит и геденбергит. Минералогический состав конвертерного шлака составляют различные оксиды металлов, не связанные в минеральные комплексы, из которых особого внимания заслуживает оксид кальция, а также вторичный кальцит – продукт карбонизации CaO . В качестве минеральных комплексов в составе пробы ЧМК-КШ идентифицируется сребродольскит и ларнит. Фаза ларнита (белита) на 90% составляет основу минералогического состава нефелинового шлама, что позволяет классифицировать фазовый состав пробы ПГЛЗ как мономинеральный – белитовый. Основными минералами, сформировавшими структуру шлака отвалного ферросплавного производства ТФЗ, являются форстерит и шпинель.

Способность минералов ТОМ вступать в химическое взаимодействие и связывать CO_2 устанавливали методами химической термодинамики, используя программный комплекс FactSage, версия 8, составленный на основе слияния термохимических пакетов FACT-Win/F*A*C*T и ChemSage/SOLGASMIX и представляющий собой набор модулей с общеизвестными справочными термодинамическими параметрами для различных твердых, жидких и газообразных веществ. Для проведения термодинамических расчетов карбонизации были составлены возможные общие уравнения химических реакций карбонизации основных минералов ТОМ и рассчитаны тепловой эффект (ΔH), изменение энтропии (ΔS) и изменение изобарно-изотермического потенциала (из-

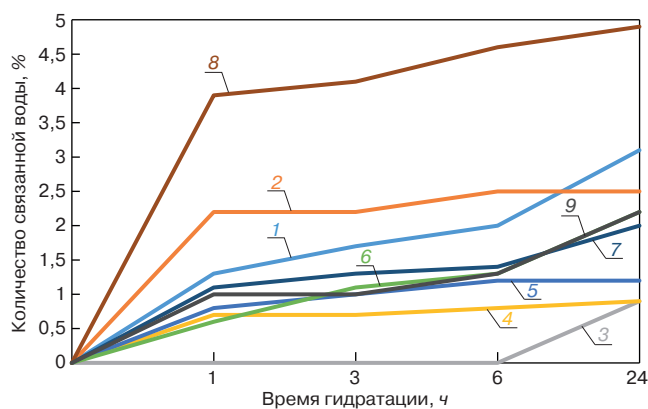
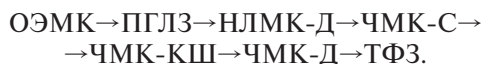


Рис. 1. Изменение количества связанной воды в пробах ТОМ: 1 – НЛМК-Д; 2 – НЛМК-Г; 3 – ТФЗ; 4 – ЧМК-Д; 5 – ЧМК-Г; 6 – ЧМК-КШ; 7 – ЧМК-С; 8 – ОЭМК; 9 – ПГЛЗ

Fig. 1. Change in the amount of bound water in samples of technogenic waste of metallurgy: 1 – Novolipetsk metallurgical combine – blast furnace slag dump; 2 – Novolipetsk metallurgical combine – granulated blast furnace slag; 3 – Tikhvin Ferroalloy Plant – ferrochrome production waste slag; 4 – Cherepovets Metallurgical Plant – blast furnace slag dump; 5 – Cherepovets Metallurgical Plant – granulated blast furnace slag; 6 – Cherepovets Metallurgical Plant – converter sludge; 7 – Cherepovets Metallurgical Plant – Steelmaking slag; 8 – Oskol Electrometallurgical Plant – electric furnace slag; 9 – Pikolev alumina refinery – nepheline sludge

менение энергии Гиббса, ΔG) (табл. 8), по которому судили о степени вероятности вступать в химическую реакцию карбонизации. Минералы в таблице расположены в порядке убывания степени вероятности вступать в химическую реакцию карбонизации.

Основываясь на результатах термодинамических исследований и фазово-минералогического состава, исследуемые пробы техногенных отходов в зависимости от их способности связывать CO_2 можно расположить в следующем порядке (от наиболее к менее способному):



Карбонизация в общем случае представляет собой насыщение жидкой фазы (раствора) материала CO_2 с образованием различных карбонатных соединений. Для исследуемых систем на основе ТОМ в результате их карбонизации образуются CaCO_3 и MgCO_3 (табл. 8). Это гетерогенные реакции, в которых участвуют твердая (ТОМ), жидкая (H_2O) и газообразная (CO_2) составляющие. Согласно классическим представлениям протекания гетерогенных реакций [44] при реакции карбонизации минеральных техногенных отходов в любой момент времени происходит процесс взаимодействия в трех фазах:

- в жидкой фазе – диссоциация гидратных соединений, образующихся в системе при взаимодействии минералов ТОМ с водой; угольной кислоты; абсорбция углекислого газа;
- в газообразной фазе – переход углекислого газа из газовой среды в капиллярную жидкость, испарение паров воды в процессе экзотермического нагрева;
- в твердой фазе – образование коллоидных частиц, кластеров до критического размера, посткритических ядер, кристаллов и их полиморфные переходы.

Таким образом, процесс карбонизации ТОМ представляется как сложное структурно-химическое преобразование, проходящее в полиагрегатной и многокомпонентной системе. Следуя ионной природе процессов [45], главная реакция образования твердых осадков CaCO_3 и MgCO_3 будет происходить в жидкой составляющей системы. Поэтому, прежде чем произойдет ионная реакция, газ CO_2 одновременно с твердыми фазами техногенных отходов должен пройти через предварительный процесс растворения.

Исследования по определению способности ТОМ, измельченных до удельной поверхности от 260 до 310 m^2/kg , взаимодействовать с водой, образуя гидратные соединения, показали, что все исследуемые пробы ТОМ, за исключением пробы ТФЗ, способны связывать воду и образовывать гидратные соединения в первый час после затворения водой, причем этот период является наиболее активной фазой их гидратации (рис. 1).

Наибольшей гидратационной активностью обладают пробы ТОМ электросталеплавильного шлака ОЭМК, доменные шлаки НЛМК (пробы НЛМК-Г и НЛМК-Д). Так, при выдерживании теста из пробы ОЭМК в течение часа количество связанной воды составляет порядка 3,9%, у проб НЛМК-Г и НЛМК-Д – соответственно 2,2 и 1,3%. Значительной потенциальной гидратационной активностью обладает проба доменного отвального шлака ПАО «НЛМК», в которой к 24 ч выдерживания количество связанной воды составляет 3,1%.

Проба ТФЗ в течение минимум 6 ч проявляет абсолютную инерцию к воде, образуя гидратные соединения к 24 ч гидратации всего порядка 0,9%. Слабой гидратационной активностью отличаются и пробы доменных шлаков отвального и гранулированного ЧерМК. В течение 1 ч гидратации в образцах проб ЧМК-Д и ЧМК-Г гидратных соединений образуется порядка 0,7 и 0,8%, а через 24 ч их количество увеличивается до 0,9 и 1,2 % соответственно.

Образец теста конвертерного шлака (проба ЧМК-КШ) в 1 ч гидратации связывает не более 0,6% воды, однако к 24 ч количество связанной воды увеличивается в 3,7 раза, достигая значения 2,2%. Исходя из минералогического состава пробы (табл. 7) можно заключить, что частицы CaO , идентифицируемые в составе пробы, находятся в пережженном состоянии и гашение их растянуто во времени.

Пробы ЧМК-С и ПГЛЗ демонстрируют сходный характер связывания воды. Так, в течение первого часа количество связанной воды составляет 1 и 1,1%, через 24 ч оно удваивается и составляет 2 и 2,2%.

Особенностью гидратации образцов сталеплавильных шлаков проб ЧМК-С и ОЭМК является выделение тепла при затворении их водой, что также свидетельствует о высокой гидратационной активности данных ТОМ.

Исследование реакционной способности техногенных отходов к связыванию CO_2 проводили на

опытных образцах-цилиндрах, изготовленных способом полусухого прессования. Данный способ получения опытных образцов позволяет наилучшим образом смоделировать системы с оптимальным количеством воды, обеспечивающим их принудительную карбонизацию. Известно [46–48], что избыток воды в системе блокирует диффузию CO_2 и тормозит реакцию карбонизации.

Результаты испытаний опытных образцов исследуемых техногенных отходов приведены в табл. 9.

Как видно из опытных данных, способность карбонизироваться проявляют все исследуемые ТОМ, кроме пробы шлака отвального ферросплавного ТФЗ, которая поглощает не более 0,1% CO_2 относительно массы сухого шлака. Незначительная степень карбонизации пробы ТФЗ отражается и на прочностных показателях опытных образцов-цилиндров, подверженных принудительной карбонизации, которая в зависимости от давления прессования – 10, 20 и 30 МПа – составляет соответственно 0,9, 1,2 и 1,3 МПа.

Наибольшей способностью поглощать и связывать CO_2 отличаются пробы нефелинового шлама ПГЛЗ и сталеплавильных шлаков отвальных ОЭМК и ЧерМК. Так, опытные образцы из ПГЛЗ связывают от 11,3 до 12% CO_2 , образцы из ОЭМК поглощают от 9 до 9,2 % CO_2 , а образцы из пробы ЧМК-С – порядка 8,8%. Конвертерный шлак ЧерМК ПАО «Северсталь», несмотря на то, что содержит 12,5% CaO (табл. 7), не отличается значительным количеством поглощенного углекислого газа, которое составляет от 2 до 3,8%.

Способность доменных отвальных шлаков связывать CO_2 ниже, чем, например, у сталеплавильных, и зависит от фазово-минералогического состава ТОМ. Так шлак НЛМК-Д, связывая порядка 5,5% CO_2 , наряду с окерманитом содержит такие фазы, как псевдоволластонит ($\alpha\text{-CaSiO}_3$) и $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$, а шлак ЧМК-Д, связывая всего порядка 2,9%, содержит в своей структуре лишь окерманит. Аналогичной способностью реагировать с CO_2 характеризуются и пробы шлаков доменных гранулированных тех же металлургических предприятий. Проба НЛМК-Г в результате принудительной карбонизации опытных образцов связывает порядка 5% CO_2 , а проба ЧМК-Г – 0,8%.

Прочность при сжатии опытных образцов (табл. 9) возрастает с увеличением удельного давления прес-

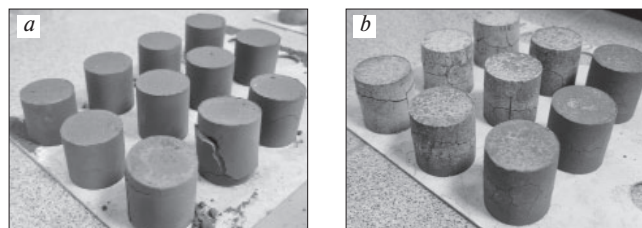


Рис. 2. Опытные образцы-цилиндры из пробы ЧМК-С: а – карбонизированные; б – некарбонизированные

Fig. 2. Prototypes-cylinders from a sample of steelmaking slag of the Cherepovets metallurgical combine: a – carbonized; b – not carbonized

**Таблица 9
Table 9**

**Свойства опытных образцов-цилиндров, подверженных принудительной карбонизации (карбонатное твердение) и выдержанных в нормальных условиях в эксикаторе (гидратное твердение)
Properties of experimental samples-cylinders subjected to forced carbonation (carbonate hardening) and kept under normal conditions in a desiccator (hydrate hardening)**

Шифр пробы ТОМ	Водосодержание формовочной смеси W_{II} , мас. %	Удельное формовочное давление пресования P_0 , МПа	Средняя плотность образцов-сырцов ρ_0 , кг/м ³	Вид твердения образцов	Свойства опытных образцов после твердения					Количество связанного CO ₂ относительно массы ТОМ, %
					В естественном состоянии		В сухом состоянии			
					ρ_0 , кг/м ³	W_m , мас. %	ρ_0 , кг/м ³	$R_{сж}$, МПа	δ , мм	
НЛМК-Д	9,1	10	1923	Карбонатное	1958	4,2	1879	29,8	5	5,5
				Гидратное	1915	8	1773	1,3	-	-
		20	2026	Карбонатное	2065	4,2	1983	43,1	5	5,5
				Гидратное	2016	7,9	1869	2,4	-	-
		30	2097	Карбонатное	2130	4,2	2044	52,5	5,5	5,6
				Гидратное	2093	8	1938	3	-	-
НЛМК-Г	9,1	10	1819	Карбонатное	1840	4,5	1760	17,8	5	5,3
				Гидратное	1817	8,6	1673	0,4	-	-
		20	1903	Карбонатное	1930	4,5	1846	29,1	4,5	5
				Гидратное	1896	8,5	1748	0,8	-	-
		30	1943	Карбонатное	1961	4,2	1883	33,5	4,5	5
				Гидратное	1944	7,9	1801	0,9	-	-
ТФЗ	9,1	10	2142	Карбонатное	2129	5,7	2014	0,9	0	0,1
				Гидратное	2137	6,3	2010	0,3	-	-
		20	2239	Карбонатное	2222	5,9	2098	1,2	0	0,1
				Гидратное	2237	6,6	2098	0,6	-	-
		30	2346	Карбонатное	2279	5,9	2152	1,3	0	0,1
				Гидратное	2290	6,5	2150	0,7	-	-
ЧМК-Д	9,1	10	1881	Карбонатное	1886	5,5	1788	6,6	2,5	2,9
				Гидратное	1877	7,9	1740	1,1	-	-
		20	1957	Карбонатное	1958	5,4	1859	10,2	2,5	2,9
				Гидратное	1958	7,8	1816	1,7	-	-
		30	2017	Карбонатное	2017	5,4	1913	13,2	2	2,9
				Гидратное	2016	8	1868	2,1	-	-
ЧМК-Г	9,1	10	1749	Карбонатное	1743	7,2	1626	0,6	1,5	0,7
				Гидратное	1744	8,4	1609	0,2	-	-
		20	1831	Карбонатное	1823	6,9	1704	0,8	1,5	0,7
				Гидратное	1827	8,2	1688	0,4	-	-
		30	1873	Карбонатное	1861	6,9	1741	1,1	1	0,8
				Гидратное	1872	8,3	1729	0,5	-	-
ЧМК-С	11,1	10	2563	Карбонатное	2647	3,8	2551	103	5	8,7
				Гидратное	2497	5,8	2359	1,8*	-	-
		20	2671	Карбонатное	2747	3,9	2643	101,6*	4,5	6,8
				Гидратное	2589	6,4	2433	2,8*	-*	-
		30	2682	Карбонатное	2675	5,5	2535	-**	-**	3,8
				Гидратное	2613	6,3	2458	3,7*	-	-
ЧМК-КШ	11,1	10	2379	Карбонатное	2420	8,8	2226	21	2,5	3,8
				Гидратное	2367	11,2	2128	1,8	-	-
		20	2507	Карбонатное	2536	9,8	2310	15,8	2	2,5
				Гидратное	2493	11,6	2234	3,3	-	-
		30	2586	Карбонатное	2602	9,5	2377	16,9	1,7	2
				Гидратное	2577	11,1	2320	4,9	-	-

Окончание табл. 9
End of Table 9

Шифр пробы ТОМ	Водосодержание формовочной смеси W_f , мас. %	Удельное формовочное давление прессования P_0 , МПа	Средняя плотность образцов-сырцов ρ_0 , кг/м ³	Вид твердения образцов	Свойства опытных образцов после твердения					Количество связанного CO ₂ относительно массы ТОМ, %
					В естественном состоянии		В сухом состоянии			
					ρ_0 , кг/м ³	W_m , мас. %	ρ_0 , кг/м ³	$R_{сж}$, МПа	δ , мм	
ОЭМК	9,1	10	2148	Карбонатное	2261	6,7	2120	65,3	4,5	9
				Гидратное	2134	10,6	1930	3,3	–	–
		20	2233	Карбонатное	2364	6,3	2224	105,2	4,5	9,2
				Гидратное	2219	9,7	2022	5,5	–	–
		30	2317	Карбонатное	2428	6,1	2288	106,2	4,5	9,2
				Гидратное	2319	9,7	2114	7,5	–	–
ПГЛЗ	11,1	10	1915	Карбонатное	2006	5	1911	32,2	5,7	11,3
				Гидратное	1854	8,1	1715	0,8	–	–
		20	2004	Карбонатное	2100	4,3	2014	63,6	5,5	11,8
				Гидратное	1948	8,5	1795	1,3	–	–
		30	2057	Карбонатное	2164	4,6	2069	79,4	5,8	12
				Гидратное	1992	7,8	1847	2,3	–	–

Примечание. * Отдельные трещины в образце; ** Разрушение образца.

сования и зависит от степени их карбонизации. Как видно из опытных данных, наибольшей прочностью отличаются принудительно карбонизированные образцы на основе сталеплавильных шлаков и нефелинового шлама. Прочность образцов на основе шлака ЧМК-С, полученных при давлении прессования 10 МПа, после их карбонизации составляет 103 МПа, а образцов, не подвергнутых принудительной карбонизации, – 1,8 МПа. Особенностью данных образцов является возникновение трещин и разрушение образцов (рис. 2) вследствие силикатного распада минералов шлака. Как видно из расчетных данных, приведенных в табл. 6, шлак ЧМК-С наиболее склонен к силикатному распаду. Причем следует отметить, что деформации возникают в карбонизированных образцах, полученных при максимальном давлении прессования, связывающих наименьшее количество CO₂. Опытные образцы, которые не подвергались принудительной карбонизации, разрушились вне зависимости от параметров их формования. В ходе принудительной карбонизации, в результате химического взаимодействия активных минералов шлака с CO₂, в системе возникает вторичный карбонат кальция, который заполняет поры и микротрещины в материале, тем самым снижая риск развития в нем деформаций. Кроме того, образцы, которые хранились в нормальных воздушно-влажностных условиях в течение 24 ч, подвержены высолообразованию; на поверхности карбонизированных образцов высолы отсутствуют. Принудительная карбонизация не только снижает развитие деформаций, но и препятствует появлению высолов в материале.

Принудительно карбонизированные образцы-цилиндры из электросталеплавильного шлака пробы

ОЭМК также обладают прочностью при сжатии более 100 МПа, достигая значений 65,3, 105,2 и 106,2 МПа при давлении прессования опытных образцов 10, 20 и 30 МПа соответственно; прочность некарбонизированных образцов составляет соответственно 3,3; 5,5 и 7,5 МПа.

Образцы из нефелинового шлама пробы ПГЛЗ, несмотря на максимальное количество связываемого ими CO₂, обладают меньшей прочностью при сжатии, чем образцы из шлаков сталеплавильных производств, которая в зависимости от удельного формовочного давления 10, 20 и 30 МПа составляет соответственно 32,2; 63,6 и 79,4 МПа.

Прочность опытных образцов на основе конвертерного шлама с увеличением формовочного давления снижается с 21 МПа у образцов, полученных при давлении прессования 10 МПа, до 15,8 и 16,9 МПа, сформованных при давлении 20 и 30 МПа соответственно. Основная причина такого эффекта кроется в составе пробы ЧМК-КШ, отличающейся значи-

Таблица 10
Table 10
Содержание новообразованного CaCO₃ в принудительно карбонизированных образцах ТОМ
The content of newly formed CaCO₃ in forcibly carbonized samples of technogenic waste of metallurgy

Шифр пробы ТОМ	Содержание CaCO ₃ , мас. %
ЧМК-С	43,4
ОЭМК	44,7
ПГЛЗ	41
НЛМК-Д	28

тельным содержанием металлических частиц, не поглощающих, а адсорбирующих воду на своей поверхности. Из-за этого в материале образуется много свободной воды, которая заполняет поры в материале, препятствует диффузии CO_2 в образце и снижает степень его карбонизации.

Прочность при сжатии образцов-цилиндров, изготовленных из шлаков доменных отвальных и гранулированных НЛМК и ЧерМК, соответствует показателям связывания CO_2 . Так, например, прочность образцов, полученных из отвального шлака НЛМК-Д при удельном давлении прессования 10; 20 и 30 МПа, составляет соответственно 29,8; 43,1 и 52,5 МПа, что в 4–4,5 раза больше прочности при сжатии образцов из отвального шлака пробы ЧМК-Д, а прочность опытных образцов из гранулированных шлаков НЛМК составляет 17,8; 29,1 и 33,5 МПа, что больше прочности образцов-цилиндров на основе пробы ЧМК-Г в 30–35 раз.

Таким образом, при анализе опытных данных по количеству связывания CO_2 и прочности при сжатии образцов-цилиндров полусухого прессования из ТОМ прослеживается определенная закономерность. Более высокими показателями по количеству связывания CO_2 и физико-механическим характеристикам отличаются ТОМ, минералогический состав которых содержит такие минералы, как псевдоволастонит, двухкальциевые силикаты γ - и β -модификации, а также мервинит.

Исследованиями вида и количества новообразований в опытных образцах в результате их принудительной карбонизации методами рентгенофазового анализа установлено, что основным новообразованием в системе является CaCO_3 в двух полиморфных формах – арагонит и кальцит. Количество CaCO_3 в опытных образцах, которые характеризуются максимальными прочностными показателями, составляет не менее 40% (табл. 10).

Таким образом, комплексно оценивая представленные опытные данные, можно заключить, что исследуемые техногенные отходы предприятий черной и цветной металлургии, кроме шлаков отвальных ферросплавного производства ТФЗ, способны поглощать и связывать CO_2 , повышая при этом свои физико-механические свойства. Высокие физико-механические характеристики, а также предварительный анализ структуры материала опытных образцов полусухого прессования, формируемой в результате их принудительной карбонизации, позволяют сделать вывод, что материал, полученный по технологии карбонизационного твердения на основе рассмотренных ТОМ, может являться в качестве матричной субстанции для различных строительных материалов и изделий. Наиболее перспективным сырьем для производства строительных материалов и изделий являются шлаки сталеплавильных производств и нефелиновый шлам от переработки глиноземного сырья, а также доменные шлаки, в минералогическом составе которых содержатся си-

ликатно-кальциевые комплексы. Полученные результаты открывают определенные перспективы по разработке научно-технологических основ получения на основе техногенных отходов принудительного карбонатного твердения строительных материалов и изделий широкой номенклатуры: стеновых, для мощения территорий, легких ячеистых бетонов, а также искусственных заполнителей (гравия), как плотных – для тяжелых конструкционных бетонов, так и легких – для конструкционно-теплоизоляционных бетонов.

Список литературы / References

1. Специальный доклад МГЭИК. Улавливание и хранение двуокиси углерода. 2005. (редакторы Берт Метц, Огунладе Дэвидсон Хелен де Конинк, Мануэла Лоос, Лео Мейер), 2005. Версия в электронном виде доступна на веб-сайте Секретариата МГЭИК: www.ipcc.ch (дата обращения 12.06.2023).
1. IPCC Special Report. Capture and storage of carbon dioxide. 2005. (eds. Bert Metz, Ogunlade Davidson Helen de Koninck, Manuela Loos, Leo Meyer), 2005. An electronic version is available on the IPCC Secretariat website: www.ipcc.ch (Date of access 12.06.23).
2. Технологический обзор. Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS). 2022. [Technology Brief. Carbon Capture, Use And Storage (CCUS)]. <https://shop.un.org> (дата обращения 12.06.2023).
2. Technology Brief. Carbon Capture, Use And Storage (CCUS). 2022. <https://shop.un.org> (Date of access 12.06.23).
3. Bui Mai, Adjiman Claire S., Bardow André and others. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*. 2018. 11, pp. 1062–1176. DOI: 10.1039/c7ee02342a
4. D'Alessandro Deanna M., Smit Berend, Long Jeffrey R. Carbon dioxide capture: prospects for new materials. *Angewandte Chemie International Edition*. 2010. Vol. 49, pp. 6058–6082. DOI: 10.1002/anie.201000431
5. Gulzar A., Gulzar A., Ansari M.B. He F., Gai S., Yang P. Carbon dioxide utilization: A paradigm shift with CO_2 economy. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2020. Vol. 3. 100013. DOI: 10.1016/j.cej.2020.100013
6. Fatima S.S., Borhan A., Ayoub M., Ghani N.A. Development and progress of functionalized silica-based adsorbents for CO_2 capture. *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 338. 116913. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116913
7. CO_2 Emissions in 2022. International Energy Agency (IEA). Flagship report March 2023. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022> (дата обращения 12.06.2023).

8. Сазанов Ю.Н., Грибанов А.В. Карбонизация полимеров. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 296 с.
8. Sazanov Yu.N., Gribanov A.V. Carbonizatsiya polimero-rov [Carbonization of polymers]. Saint Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2013. 296 p.
9. Ущеров-Маршак А.В. Бетонovedение: лексикон. М.: РИФ «Стройматериалы», 2009. 112 с.
9. Usherov-Marshak A.V. Betonovedeniye: lexicon [Concrete science: lexicon]. Moscow: RIF Stroymateri-aly, 2009. 112 p.
10. Proctor D.M., Fehling K.A., Shay E.C., Wittenborn J.L., Green J.J., Avent C., Bigham R.D., Connolly M., Lee B., Shepker T.O. and Zak M.A. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science and Technology*. 2000. Vol. 34, pp. 1576–1582. DOI: 10.1021/ES9906002
11. Lin B., Wang H., Zhu X., Liao Q., Ding B. Crystallization properties of molten blast furnace slag at different cooling rates. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 96, pp. 432–440. DOI: 10.1016/j.applther- maleng.2015.11.075
12. Sanjuan M.A., Estevez E., Argiz C., del Barrio D. Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 90, pp. 257–265. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.006
13. Seo J., Kim S., Park S., Yoon H.N., Lee H.K. Carbonation of calcium sulfoaluminate cement blend- ed with blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. Article 103918. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103918
14. Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E. CO₂ mineral sequestration with the use of ground granulated blast furnace slag. *Gospod. Surowcami Miner*. 2017. Vol. 33, pp. 111–124. DOI: 10.1515/gospo-2017-0008
15. You K.S., Lee S.H., Hwang S.H., Kim H.S., Ahn J.W. CO₂ sequestration via a surface –modified ground granulated blast furnace slag using NaOH solution. *Materials Transactions*. 2011. Vol. 52, pp. 1972–1976. DOI: 10.2320/matertrans.M2011110
16. Ren E., Tang S., Liu C., Yue H., Li C., Liang B. Carbon dioxide mineralization for the disposition of blast-furnace slag: reaction intensification using NaCl solutions. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. 2020. Vol. 10, pp. 436–448. DOI: https://doi. org/10.1002/ghg.1837
17. Huijgen W.J., Witkamp G.J., Comans R.N.J. Mechanisms of aqueous wollastonite carbonation as a possible CO₂ sequestration process. *Chemical Engineering Science*. 2006. Vol. 61, pp. 4242–425. DOI: 10.1016/j.ces.2006.01.048
18. Huijgen W.J., Witkamp G.J., Comans R.N. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39, pp. 9676–9682. DOI: 10.1021/es050795f
19. Zhong X., Li L., Jiang Y., Ling T.-C. Elucidating the dominant and interaction effects of temperature, CO₂ pressure and carbonation time in carbonating steel slag blocks. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 302. Article 124158. DOI: 10.1016/j.conbuild- mat.2021.124158
20. Shi C., Wu Y. Studies on some factors affecting CO₂ curing of lightweight concrete products. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008. Vol. 52 (8–9), pp. 1087–1092. DOI: https://doi.org/10.1016/j.res- conrec.2008.05.002
21. Mahoutian M., Ghoulah Z., Shao Y. Carbon dioxide activated ladle slag binder. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66, pp. 214–221. DOI: 10.1061/ (ASCE)MT.1943 –5533.0001055
22. Siriwardena D.P. Quantification of CO₂ sequestration capacity and carbonation rate of alkaline industrial byproducts. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 19, pp. 216–224. DOI: 10.1016/j.conbuild- mat.2015.05.035
23. Yadav S., Mehra A. Experimental study of dissolu- tion of minerals and CO₂ sequestration in steel slag. *Waste Management*. 2017. Vol. 64, pp. 348–357. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.03.032
24. Ukwattage N.L., Ranjith P.G., Li X. Steel-making slag for mineral sequestration of carbon dioxide by accelerated carbonation. *Measurement*. 2017. Vol. 97, pp. 15–20. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.10.057
25. Mo L., Zhang F., Deng M. Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 88, pp. 217–226. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.05.013
26. Mai U., Rein K., Lale A., Kalle K. The CO₂-binding by Ca–Mg–silicates in direct aqueous carbonation of oil shale ash and steel slag. *Energy Procedia*. 2011. Vol. 4, pp. 925–932. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.01.138
27. Santos R.M., Van Bouwel J., Vandeveld E., Mertens G., Elsen J., Van Gerven T. Accelerated min- eral carbonation of stainless steel slags for CO₂ storage and waste valorization: effect of process parameters on geochemical properties. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2013. Vol. 17, pp. 32–45. DOI: 10.1016/j.ijggc.2013.04.004
28. Salman M., Cizer Ö., Pontikes Y., Santos R.M., Snellings R., Vandewalle L., Blanpain B., Van Balen K. Effect of accelerated carbonation on and stainless steel slag for its valorisation as a CO₂-sequestering construc- tion material. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 246, pp. 39–52. DOI: 10.1016/J.CEJ.2014.02.051
29. Kaliyavaradhan S.K., Ling T.-C., Mo K.H. Valorization of waste powders from cement-concrete life cycle: a pathway to circular future. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 268. Article 122358. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122358
30. Mehdizadeh H., Jia X., Mo K.H., Ling T.-C. Effect of water-to-cement ratio induced hydration on the ac- celerated carbonation of cement pastes. *Environmen- tal Pollution*. 2021. Vol. 280. Article 116914. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116914

31. Wang L., Chen L., Tsang D.C.W., Guo B., Yang J., Shen Z., Hou D., Ok Y.S., Poon C.S. Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 258. Article 20678. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120678
32. Liu Y., Zhuge Y., Chow C.W.K. and others Recycling drinking water treatment sludge into eco-concrete blocks with CO₂ curing: durability and leachability. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 746. Article 141182. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141182
33. Mahoutian M., Ghoulah Z., Shao Y. Carbon dioxide activated ladle slag binder. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66, pp. 214–221. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.063
34. Романенко И.И., Фадин А.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. № 1 (54). С. 85–92. DOI: 10.54734/20722958_2023_1_85
34. Romanenko I.I., Fadin A.I. Building materials based on activated steel-smelting slag. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2023. No. 1 (54), pp. 85–92. (In Russian). DOI: 10.54734/20722958_2023_1_85
35. Boone M.A., Nielsen P., De Kock T. and others Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray computed microtomography. *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 48 (1), pp. 674–680. DOI: 10.1021/es402767q
36. Рузавин А.А. Утилизация сталеплавильных шлаков путем ускоренной карбонизации // *Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2018. Т. 18, № 3. С. 68–72. DOI: 10.14529/build180310
36. Ruzavin A.A. Utilization of steel-smelting slags by means of accelerated carbonization. *Bulletin of SUSU. Serija «Stroitel'stvo i arhitektura»*. 2018. Vol. 18, No. 3, pp. 68–72. (In Russian). DOI: 10.14529/build180310
37. Jang J.G., Lee H.K. Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 82, pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.01.001
38. Galan I., Andrade C., Mora P., Sanjuan M.A. Sequestration of CO₂ by concrete carbonation. *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44, pp. 3181–3186. DOI: 10.1021/es903581d
39. Monkman S., Shao Y. Integration of carbon sequestration into curing process of precast concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2010. Vol. 7, pp. 302–310. DOI: 10.1139/L09-140
40. Rostami V., Shao Y., Boyd A.J., He Z. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42, pp. 186–193. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.010
41. Rostami V., Shao Y., Boyd A.J. Carbonation curing versus steam curing for precast concrete production. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24, pp. 1221–1229. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000462
42. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2020 гг. Ч. 1. М., 2022. http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf (дата обращения 07.06.2023).
42. National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Part 1. Moscow, 2022. http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf (Date of access 07.06.23). (In Russian).
43. Панова В.Ф., Панов С.А. Модель работы с техногенными продуктами как сырьем для стройиндустрии // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2012. № 1. С. 47–51.
43. Panova V.F., Panov S.A. Model of work with technogenic products as a raw material for the construction industry. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2012. No. 1, pp. 47–51. (In Russian).
44. Байков А.А. Дополнения к «Курсу общей металлургии». Гл. 3. Общие физико-химические условия превращения: Собрание трудов. М.; Л.: Изд. и 1-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР в Л., 1950. Т. 3. С. 306–341.
44. Baikov A.A. Dopolneniya k «Kursu obshchey metalurgii» [Additions to the «Course of General Metallurgy»]. Ch. III. Obshchiye fiziko-himicheskiye usloviya prevrashcheniya [General physico-chemical conditions of transformation]. Collection of works. Moscow-Leningrad: ed. and type 1. Publishing House Acad. Sciences of the USSR in Leningrad, 1950. Vol. III, pp. 306–341.
45. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. М.: Химия, 1979. 583 с.
45. Karapetyants M.Kh. Himicheskaya termodinamika [Chemical thermodynamics]. Moscow: Chemistry. 1979. 583 p.
46. Любомирский Н.В., Федоркин С.И., Лукьянченко М.А. Системы на основе извести карбонизационного твердения // *Строительные материалы*. 2008. № 11. С. 45–47.
46. Lyubomirskiy N.V., Fedorkin S.I., Lukyanchenko M.A. Systems based on lime of carbonization hardening. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 11, pp. 45–47. (In Russian).
47. Lyubomirskiy N.V., Fedorkin S.I., Bakhtin A.S., Bakhtina T.A. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary limestone raw materials. *Malaysian Construction Research Journal (MCRJ)*. 2017. Vol. 23, No. 3, pp. 15–26.
48. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Fic S., Szafranec M., Bakhtina T. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw materials. *Materials*. 2020. Vol. 13 (10). Article 2304. DOI: 10.3390/ma13102304

УДК 666.189.3

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-95-99>

А.И. ПАНЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор (intra-baup@list.ru);

В.А. МИХАЙЛОВ, аспирант (www.inanac@mail.ru)

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

Моделирование и экспериментальное исследование плотности упаковки пеностеклобетона

Рассматривается процесс получения и свойства пеностеклобетона – композитного материала, состоящего из модифицированного гипсового вяжущего и гранулированного пеностекла в качестве заполнителя. Пеностеклобетон обладает высокой прочностью, долговечностью, экологичностью и низкой теплопроводностью, что делает его перспективным материалом для стеновых конструкций. Получены оптимальные плотности упаковки за счет использования разработанных авторами программ на языке программирования Python для расчета оптимальных диаметров трех фракций гранулированного пеностекла в ортогональной или гексагональной модели упаковки. Исследована прочность при сжатии и изгибе, а также коэффициент теплопроводности на образцах различных составов. За счет воздухововлекающей добавки снижено значение коэффициента теплопроводности пеностеклобетона. В заключение предложен оптимальный состав пеностеклобетона с учетом всех исследованных параметров.

Ключевые слова: пеностеклобетон, гранулированное пеностекло, упаковка гранул, модифицированное гипсовое вяжущее, прочность при сжатии, коэффициент теплопроводности, воздухововлекающая добавка.

Для цитирования: Панченко А.И., Михайлов В.А. Моделирование и экспериментальное исследование плотности упаковки пеностеклобетона // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 95–99. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-95-99>

A.I. PANCHENKO, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (intra-baup@list.ru), V.A. MIKHAILOV, Postgraduate student (www.inanac@mail.ru)
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Modeling and Experimental Study of Packing Density of Foam Glass Concrete

The paper deals with the process of production and properties of foam glass concrete – a composite material consisting of modified gypsum binder and granulated foam glass as an aggregate. Foam glass concrete has high strength, durability, environmental friendliness and low thermal conductivity, which makes it a promising material for wall structures. Optimal packing densities were obtained by using programs developed by the authors in the Python programming language to calculate the optimal diameters of three fractions of granular foam glass in an orthogonal or hexagonal packing model. The compressive and flexural strength and thermal conductivity coefficient were investigated on samples of different compositions. The value of the thermal conductivity coefficient of the foam glass concrete was reduced due to the air-entraining additive. In conclusion, the optimum composition of foam glass concrete was proposed taking into account all investigated parameters.

Keywords: foam glass concrete, granulated foam glass, granule packing, modified gypsum binder, compressive strength, thermal conductivity coefficient, air-entraining additive.

For citation: Panchenko A.I., Mikhailov V.A., Modeling and experimental study of packing density of foam glass concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 95–99. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-95-99>

Ограждающие конструкции являются важным элементом зданий и сооружений, которые должны обеспечивать не только несущую функцию, но и теплозащиту, звукоизоляцию и защиту от внешних воздействий. Поэтому к материалам для стеновых конструкций предъявляются требования по прочности, теплоизоляции, долговечности и экологичности. Однако не все используемые в настоящее время стеновые материалы могут удовлетворить этим требованиям одновременно, что является причиной использования в целом ряде случаев многослойных ограждающих конструкций, которые менее технологичны и в силу многослойности имеют меньшую эксплуатационную надежность. Низкая теплопроводность при достаточно высокой прочности, а также стойкость к атмосферным воздействиям – требования, которым должен отвечать материал для однослойных ограждающих конструкций. В значительной степени таким сочетанием свойств обладает пеностеклобетон. Пеностеклобетон – это композиционный материал, состоящий из вяжущего и гранулированного пено-

стекла различных фракций в качестве заполнителя [1–3]. Этот материал сочетает в себе преимущества пеностекла и бетона, такие как низкая плотность, высокая прочность, устойчивость к атмосферным воздействиям и экологичность. Пеностеклобетон может быть использован в качестве стенового материала для различных типов зданий и сооружений.

Гранулированное пеностекло – это ячеистый теплоизоляционный материал неорганического происхождения, получаемый из предварительно молотого стекла методом спекания с добавлением пенообразователя [4, 5]. Этот материал имеет высокую пористость (до 90%), низкую плотность (100–300 кг м³), высокую прочность (до 10 МПа) и низкую теплопроводность (0,04–0,08 Вт/(м·К)). Кроме того, пеностекло обладает долговечностью, огнестойкостью и экологичностью [6, 7]. Гранулированное пеностекло может быть использовано в качестве заполнителя для пеностеклобетона, так как оно улучшает его теплотехнические характеристики и снижает плотность [8, 9]. Кроме того, очень важно, что гранулированное пено-

стекло имеет шаровидную форму, это обеспечивает наибольшее совпадение результатов теоретических расчетов и практического использования разных фракций пеностекла для получения оптимальной упаковки зерен в единице объема. Для получения пеностеклобетона с оптимальными свойствами предлагается использовать три фракции гранулированного пеностекла различного диаметра (2–10 мм), что обеспечит максимальную упаковку заполнителя и минимальное количество вяжущего [10, 11]. Такой подход позволит повысить теплоизоляционные свойства пеностеклобетона.

Материалы и методы

Для изготовления пеностеклобетона использовалось модифицированное гипсовое вяжущее, состоящее из смеси гипса, микрокремнезема и извести в соотношении 80:11:9. В качестве заполнителя применялось гранулированное пеностекло трех фракций: 2–4; 4–8; и 8–10 мм.

Для определения оптимального состава пеностеклобетона проводился анализ упаковки гранул пеностекла. Упаковка гранул рассчитывалась с помощью компьютерной программы. Также упаковка гранул проверялась экспериментальным методом, при котором форма размером 100×100×100 мм заполнялась гранулами пеностекла, затем добавлялась вода до верхнего края формы и измерялся ее объем. Пустотность определялась по формуле:

$$\Pi = \frac{V_{\text{гранул}}}{V_{\text{формы}}} = \frac{V_{\text{формы}} - V_{\text{воды}} - V_{\text{погл. воды}}}{V_{\text{формы}}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{гранул}}$ – объем гранул пеностекла; $V_{\text{формы}}$ – объем формы; $V_{\text{воды}}$ – объем воды затворения; $V_{\text{погл. воды}}$ – объем воды, поглощенной пеностеклом.

Наиболее эффективный состав пеностеклобетона с максимальным соотношением прочности при сжатии к коэффициенту теплопроводности $R_{\text{сж}}/\lambda$ был рассчитан с помощью авторской программы для ЭВМ, а в дальнейшем подтвержден экспериментом.

Образцы пеностеклобетона изготавливались с помощью лабораторной бетономесительной установки. Сначала в смеситель загружались гранулы пеностекла и вода, а затем вяжущее. Смесь перемешивалась в течение 5 мин до получения однородной консистенции. Эта последовательность определена в

результате исследования метода подготовки смеси, в котором рассмотрено шесть различных вариантов, и образцы, полученные в этой последовательности, имели лучшие характеристики.

Для определения прочности при сжатии и изгибе смесь укладывалась в металлические формы размером 40×40×160 мм, а для определения коэффициента теплопроводности – размером 100×100×100 мм. Далее образцы распиливались на пластины 100×100×20 мм. Образцы уплотнялись вибратором и оставались в формах при комнатной температуре на сутки. После этого образцы вынимались из форм и помещались в термокамеру для ускорения твердения при температуре 60°C в течение 24 ч.

Прочность при сжатии и изгибе образцов пеностеклобетона определялась на испытательном прессе «С», модификация 50-с8455, по стандартным методикам. Коэффициент теплопроводности λ образцов пеностеклобетона измерялся на приборе ИТП-МГ4-100 по методу теплового потока.

Результаты и обсуждение

Учитывая, что гранулы пеностекла имеют практически сферическую форму, что облегчает использование математических методов для оценки вариантов расположения гранул в единице объема бетона, решено оптимизировать состав пеностеклобетона путем выбора оптимальной с точки зрения теплопроводности и прочности упаковки гранул.

Для этого разработаны две программы на языке Python [12], которые позволяют рассчитать оптимальные диаметры трех фракций гранулированного пеностекла для достижения максимальной плотности упаковки (минимальной пустотности заполнителя) в ортогональной и гексагональной формах (рис. 1) [13–15]. Программы требуют ввода размеров формы, в которой будут упакованы сферы, и радиуса большей фракции сферы. Затем программы автоматически определяют диаметры двух меньших сфер, которые могут быть расположены вместе с большой сферой внутри формы, а также количество всех сфер, помещающихся в форме. Соотношение диаметров разных фракций гранулированного пеностекла показано на рис. 2, где D_1 – диаметр самой большой фракции; D_2 и D_3 – диаметры двух меньших фракций, рассчитанные программой.

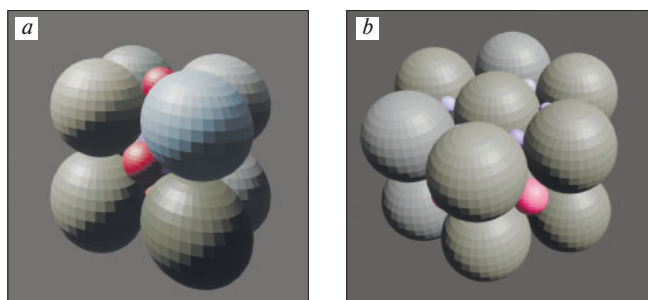


Рис. 1. Модели упаковок: а – ортогональная; б – гексагональная
Fig. 1. Packing models: a – orthogonal; b – hexagonal

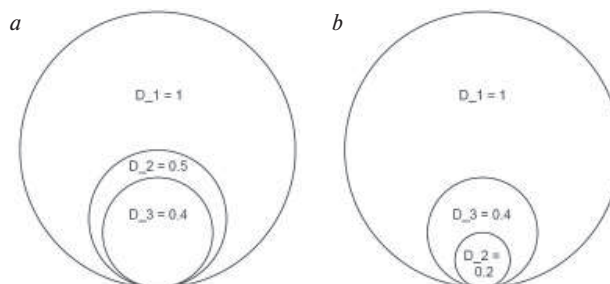


Рис. 2. Соотношение диаметров разных фракций: а – ортогональная упаковка; б – гексагональная упаковка
Fig. 2. Ratio of diameters of different fractions: a – orthogonal packing; b – hexagonal packing

Таблица 1
Table 1

Сравнение компьютерного и экспериментального расчета
Comparison of computer and experimental calculation

Вид упаковки	Ортогональная	Гексагональная
Компьютерный расчет	0,72	0,69
Экспериментальный результат	0,66	0,63

Таблица 2
Table 2

Влияние коэффициента раздвижки зерен на основные прочностные и теплофизические характеристики пеностеклобетона при ортогональной упаковке
Effect of grain sliding ratio on the main strength and thermophysical characteristics of glass-foam concrete at orthogonal packing

Коэффициент раздвижки зерен	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа	λ , Вт/(м·К)	$R_{сж}/\lambda$
1	3,62	1,74	0,188	19,25
1,2	6,42	2,66	0,203	31,62
1,4	7,01	2,87	0,223	31,43

Таблица 3
Table 3

Влияние коэффициента раздвижки зерен на основные прочностные и теплофизические характеристики пеностеклобетона при гексагональной упаковке
Effect of grain sliding coefficient on the main strength and thermophysical characteristics of glass-foam concrete with hexagonal packing

Коэффициент раздвижки зерен	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа	λ , Вт/(м·К)	$R_{сж}/\lambda$
1	3,82	1,75	0,191	20
1,2	6,47	2,77	0,215	30,09
1,4	7,14	3,01	0,23	31,04

Однако в этих программах для расчета диаметров гранул существует важный аспект, связанный с порядком выполнения расчетов. Если сначала определить второй диаметр, а затем третий, то полученная плотность упаковки будет ниже, чем если сразу найти третий диаметр. Это можно проиллюстрировать на примере кубической упаковки. При расчете второго диаметра, а затем третьего получаются значения $D_1=1$; $D_2=0,7$; $D_3=0,2$; плотность упаковки будет равна 0,67. При расчете сразу третьего диаметра, а затем второго получаются значения $D_1=1$; $D_2=0,5$; $D_3=0,4$; плотность упаковки будет равна 0,72. Поскольку количество частиц с диаметром D_3 значительно превышает количество частиц с диаметром D_2 и объем, занимаемый ими, гораздо выше, то последовательность расчета диаметров играет важную роль для получения более высокой плотности упаковок.

Так как гранулы пеностекла представляют собой практически идеальные сферы, теоретические расчетные результаты наиболее соответствуют экспери-

ментальным результатам. В этом исследовании для компьютерного расчета выбрана форма размером $100 \times 100 \times 100$ мм и диаметр самой большой фракции гранулированного пеностекла 10 мм.

Чтобы добиться еще большей плотности упаковки гранул, можно использовать четыре фракции гранулированного пеностекла, но в этом случае разница между плотностями самой большой и самой маленькой фракций более чем в два раза. У самой большой фракции пеностекла (8–10 мм) плотность равнялась 130 кг/м^3 , а у самой маленькой (0–2 мм) 300 кг/м^3 . Это приводит к тому, что самая маленькая фракция оседает на дно формы и не участвует в упаковке. Поэтому решено ограничиться тремя фракциями гранул.

Для подтверждения данных, полученных с помощью компьютерных программ, был проведен эксперимент. В форму размером $100 \times 100 \times 100$ мм засыпались гранулы пеностекла трех фракций в соответствии с рассчитанными диаметрами и пропорциями. Затем форма заполнялась водой до верхнего края и измерялся объем воды. После взвешивались влажные гранулы пеностекла и находился объем, поглощенный гранулами воды. По этим данным определялась пустотность по формуле (1). Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Разница между ортогональной и гексагональной упаковками гранул обусловлена разным количеством гранул самого большого диаметра, которые могут быть размещены в форме. При ортогональной упаковке в форме $100 \times 100 \times 100$ мм помещается 1000 гранул диаметром 10 мм, а при гексагональной – 1050. Это приводит к тому, что при гексагональной упаковке остается меньше свободного пространства для гранул меньшего диаметра; хотя их размеры, рассчитанные программами, одинаковы, однако объем, занимаемый ими, гораздо выше. Поэтому при ортогональной упаковке количество гранул третьего диаметра больше, чем при гексагональной, и соответственно плотность упаковки выше.

Для выбора оптимального состава пеностеклобетона необходимо также учесть коэффициент раздвижки зерен. Он определяет способность смеси распределиться по форме и заполнить все пространство между зернами заполнителя. Для этого изготовлены образцы пеностеклобетона различных составов в форме балок размером $40 \times 40 \times 160$ мм для определения прочности при сжатии и изгибе и в форме пластин размером $100 \times 100 \times 20$ мм для определения коэффициента теплопроводности. Результаты испытаний образцов представлены в табл. 2, 3.

Для определения оптимального состава пеностеклобетона проанализировано отношение $R_{сж}/\lambda$, характеризующее соотношение прочности при сжатии материала (МПа) и его коэффициента теплопроводности (Вт/(м·К)) в единицах измерения СИ при различных вариантах упаковки гранул и разных коэффициентах раздвижки зерен. Сравнивать образцы этим соотношением можно только при условии того, что расчет проводился в одинаковых единицах изме-

рения. Это отношение выбрано в качестве альтернативы коэффициенту конструктивного качества, который определяется как отношение прочности материала к его относительной плотности, чем больше коэффициент конструктивного качества материала, тем материал эффективнее. Так как для данного исследования более важен коэффициент теплопроводности, то решено использовать отношение $R_{сж}/\lambda$. Выявлено, что максимальное значение этого отношения (31,62) достигается при ортогональной упаковке гранул с коэффициентом раздвижки зерен 1,2. Такой состав пеностеклобетона имеет достаточно высокую прочность при сжатии (6,42 МПа) и низкий коэффициент теплопроводности (0,203 Вт/(м·К)).

Для дальнейшего снижения коэффициента теплопроводности добавлена воздухововлекающая добавка, создающая в бетоне систему закрытых и равномерно распределенных в объеме пор определенного размера в количестве 0,3% от массы сухо-

го вяжущего, которая позволила уменьшить его до 0,181 Вт/(м·К), но при этом прочность при сжатии незначительно снизилась до 6,37 МПа. Отношение $R_{сж}/\lambda$ для этого состава составило 35,19.

Выводы

1. Наибольшая плотность упаковки и соответственно наибольшее отношение прочности при сжатии к коэффициенту теплопроводности ($R_{сж}/\lambda$) достигается при ортогональной упаковке гранул пеностекла в единице объема пеностеклобетона.

2. Оптимальный состав пеностеклобетона с достаточно высокой прочностью при сжатии (6,42 МПа) и низким коэффициентом теплопроводности (0,203 Вт/(м·К)) получается при коэффициенте раздвижки зерен 1,2 и ортогональной упаковке.

3. Коэффициент теплопроводности пеностеклобетона снижается до 0,181 Вт/(м·К) при добавлении воздухововлекающей добавки.

Список литературы

1. Закревская Л.В., Попов М.Ю. Легкие бетоны на основе гранулированного пеностекла // *Архитектура. Строительство. Образование*. 2015. № 1. С. 26–31.
2. Awham M., Hamada Ruqaya F. Hameed using the glass and rubber waste as sustainable materials to prepare foamed concrete with improved properties. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 881. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012188>
3. Иванова С.М., Чулкова И.Л. Композиционный цементный пеностеклобетон // *Строительные материалы*. 2005. № 10. С. 22–28.
4. Орлов А.Д. Гранулированная пеностеклокерамика как перспективный наполнитель для нового поколения энергоэффективных бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 12. С. 13–15.
5. Сопегин Г.В. Влияние молотого фракционированного пеностекла на свойства гипсового вяжущего и сухих строительных смесей // *Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. 2020. № 1. С. 626–629.
6. Орлов А.Д., Нежиков А.В. Пеностеклокерамика как наполнитель высокотехнологичных легких бетонов // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2017. № 3. С. 163–171.
7. Чулкова И.Л., Кадцын Р.А., Кадцына А.Р. Пеностекло и пенокерамика как наполнители для ячеистых бетонов: *Сборник международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации»*. Омск, 2019. С. 469–472.
8. Ильина Л.В., Тацки Л.Н., Молодин В.В., Колесова Т.Д. Легкие бетоны с пеностеклокристаллическим наполнителем, модифицированные микро- и нанокремнеземом // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 3 (22). С. 80–85.

References

1. Zakrevskaya L.V., Popov M.Yu. Lightweight concretes on the basis of granulated foam glass. *Arhitektura. Stroitel'stvo. Obrazovanie*. 2015. No. 1, pp. 26–31. (In Russian).
2. Awham M., Hamada Ruqaya F. Hameed using the glass and rubber waste as sustainable materials to prepare foamed concrete with improved properties. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 881. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012188>
3. Ivanova S.M., Chulkova I.L. Composite cement foam glass concrete *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 10, pp. 22–28. (In Russian).
4. Orlov A.D. Granulated glass-ceramic foam as a promising aggregate for a new generation of energy-efficient concrete *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No. 12, pp. 13–15. (In Russian).
5. Sopegin G.B. Influence of ground fractionated foam glass on the properties of gypsum binder and dry building mixtures. *Molodye Uchenye – Razvitiyu Nacional'noj Tehnologicheskoy Initsiativy (POISK)*. 2020. No. 1, pp. 626–629. (In Russian).
6. Orlov A.D., Nezhikov A.V. Glass-ceramic foam as an aggregate of high-tech lightweight concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2017. No. 3, pp. 163–171. (In Russian).
7. Chulkova I.L., Kadtsyn R.A., Kadtsyn A.R. Foam-glass and foam-ceramics as aggregates for cellular concrete. *Collection of international scientific and practical conference «Architectural-building and road-transport complexes: problems, prospects, innovations»*. Omsk. 2019, pp. 469–472. (In Russian).
8. Ilyina L.V., Tatsky L.N., Molodin V.V., Kolesova T.D. Lightweight concrete with foam-glass-crystalline aggregate modified with micro- and nano-silica. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2023. No. 3 (22), pp. 80–85. (In Russian).

9. Кетов Ю.А., Словиков С.В. Синтактические полимерные композиционные материалы, высоконаполненные гранулированным пеностеклом // *Computational nanotechnology*. 2019. № 3. С. 39–46.
10. Резаев Р.О., Бородуля Н.А., Себелев И.М., Смирнова Е.И., Карасев Н.П. Подбор состава бетона с учетом толщины обмазки и плотности упаковки заполнителей // *Известия вузов. Строительство*. 2020. № 4. С. 22.
11. Стефаненко И.В., Гнедаш Е.Е., Акчурин Т.К. Оптимизация гранулометрического состава заполнителей жаростойкого бетона мелкозернистой структуры // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 4. С. 205–213.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023665187 Российская Федерация. Расчет оптимальных диаметров трех фракций гранулированного пеностекла для достижения максимальной плотности упаковки пеностеклобетона / Михайлов В.А., Панченко А.И.; заявитель и правообладатель Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. № 2023663616. Заявл. 29.06.2023; Опубл. 12.07.2023.
13. Пузренков А.Н., Сальников И.И. Методы упаковки сыпучих материалов, состоящих из элементов сферической формы. *Научное обозрение. Педагогические науки*. 2019. № 3 (ч. 2). С. 79–82.
14. Баженова О.О. Оптимизация плотности упаковки заполнителей в бетоне. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых*. Белгород. 2020. С. 1938–1941.
15. Chen C., Bai S., Huang Y., Lam L., Yao Y., Keer L.M. 3D random packing algorithm of ellipsoidal particles based on the Monte Carlo method. *Magazine of Concrete Research*. 2021. Vol. 73. No. 7, pp. 343–355. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00228>
9. Ketov Yu.A., Slovikov S.V. Syntactic polymer composites highly filled with granulated foam glass. *Computational Nanotechnology*. 2019. No. 3. pp. 39–46. (In Russian).
10. Rezaev R.O., Borodulya N.A., Sebelev I.M., Smirnova E.I., Karasev N.P. Selection of concrete composition taking into account the coating thickness and packing density of aggregates. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo*. 2020. No. 4. pp. 22. (In Russian).
11. Stefanenko I.V., Gnedash E.E., Akchurin T.K. Optimization of granulometric composition of aggregates of heat-resistant concrete of fine-grained structure. *Vestnik of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020. No. 4. С. 205–213. (In Russian).
12. Certificate of state registration of computer program 2023665187 Russian Federation. Calculation of optimal diameters of three fractions of granulated foam glass to achieve maximum packing density of foam glass concrete / Mikhailov V.A., Panchenko A.I.; applicant and right holder National Research Moscow State Construction University. No. 2023663616. Applied 29.06.2023; Published 12.07.2023. (In Russian).
13. Puzrenkov A.N., Salnikov I.I. Methods of packing bulk materials consisting of elements of spherical shape. *Nauchnoe Obozrenie. Pedagogicheskie Nauki*. 2019. No. 3 (part 2), pp. 79–82. (In Russian).
14. Bazhenova O.O. Optimization of packing density of aggregates in concrete. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists*. Belgorod. 2020, pp. 1938–1941. (In Russian).
15. Chen C., Bai S., Huang Y., Lam L., Yao Y., Keer L.M. 3D random packing algorithm of ellipsoidal particles based on the Monte Carlo method. *Magazine of Concrete Research*. 2021. Vol. 73. No. 7, pp. 343–355. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00228>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве



Авторы: В.Л. Курбатов, В.И. Римшин, И.Л. Шубин, С.В. Волкова.

Под общ. ред. членов-корреспондентов Российской академии архитектуры и строительных наук, заслуженных строителей Российской Федерации И.Л. Шубина, В.И. Римшина

Издательство АСВ. Москва. 2023. 420 с.

Изложены принципы информационного моделирования в строительстве. Освещены современные технологии информационного моделирования, описана уже действующая и дополнительно необходимая нормативная правовая база, определяющая порядок разработки и применения информационной модели на территории Российской Федерации. Рассмотрены основные этапы и состав мероприятий при разработке проектной документации с применением информационного моделирования.

Предназначено для бакалавров, магистров и преподавателей вузов, обучающихся по Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования, а также для работников предприятий строительства и жилищно-коммунального комплекса.

Рекомендовано Российской академией архитектуры и строительных наук в качестве учебного пособия для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство» (уровень бакалавриата) и 08.04.01 «Строительство» (магистратуры).

И.В. КОЗЛОВА, канд. техн. наук (iv.kozlova@mail.ru),
М.О. ДУДАРЕВА, ст. преподаватель, аспирант (modudareva@yandex.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, Москва, ул. Ярославское ш., 26)

Перспективная добавка на основе системы $TiO_2-Bi_2O_3$ для цементных композитов

К одной из центральных задач развития современного строительного материаловедения можно отнести поиск, разработку и синтез новых модифицирующих компонентов для цементных композитов, которые способны придать этому традиционному материалу уникальные свойства. В условиях текущей мировой экологической обстановки не стоит забывать о безопасности создаваемого материала для окружающей среды. Данная статья рассматривает возможность применения в качестве тонкодисперсной добавки к цементным композитам титаната висмута, который способен придать традиционному материалу бактерицидные свойства, а также способность к самоочищению благодаря окислению адсорбированных загрязнителей органического и неорганического происхождения. В ходе эксперимента по цитратной технологии проводили синтез добавки, которую затем в форме стабилизированной суспензии вводили в цемент вместо воды затворения. Изучали оптимальные способы физического воздействия для стабилизации суспензий частиц титаната висмута, что является важным фактором для достижения равномерного распределения частиц в объеме цементного композита. Отмечено возрастание прочности при сжатии в первые и третьи сутки твердения с 29 до 42 МПа (на 31, 38 и 45%) и с 53 до 70 МПа (на 28, 30 и 32%) соответственно по сравнению с контрольным образцом, а в марочном возрасте с 83 до 97 МПа (на 2, 9 и 14%).

Ключевые слова: тонкодисперсная добавка, титанат висмута, цементные композиции, пластификатор, цитратный метод, прочность.

Работа выполнена в рамках конкурса 2023 г. в поддержку проведения исследований аспирантов НИУ МГСУ.

Для цитирования: Козлова И.В., Дударева М.О. Перспективная добавка на основе системы $TiO_2-Bi_2O_3$ для цементных композитов // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 100–103. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-100-103>

I.V. KOZLOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (iv.kozlova@mail.ru),
M.O. DUDAREVA, Senior Lecturer, Graduate Student (modudareva@yandex.ru)
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

A Promising Additive Based on the $TiO_2-Bi_2O_3$ System for Cement Compositions

One of the central tasks of the development of modern building materials science is the search, development and synthesis of new modifying components for cement composites that can provide traditional materials with new unique characteristics. The current environmental situation worldwide contributes to the fact that building materials must be safe for nature, humans and animals. This article considers the possibility of using bismuth titanates as a fine additive to cement composites, which can provide traditional cement based materials with bactericidal properties, as well as the ability to self-cleaning due to the mineralization of organic and inorganic pollutants adsorbed on the surface of the material. During the experiment the additive was synthesized by citrate technology and introduced into the cement composition in the form of a stabilized suspension instead of mixing water. The optimal methods of processing to stabilize suspensions of bismuth titanates particles were studied, which is an important factor for achieving uniform particle distribution in the volume of the cement composite. There was an increase in compressive strength on the first and third days of hardening from 29 to 42 MPa (by 31, 38 and 45%) and from 53 to 70 MPa (by 28, 30 and 32%), respectively. At 28 days age the compressive strength increased from 83 to 97 MPa (by 2, 9 and 14%) compared with the control sample.

Keywords: fine additive, bismuth titanates, cement compositions, plasticizer, citrate method, strength.

The work was carried out within the framework of the 2023 year MGSU competition to support the research of graduate students.

For citation: Kozlova I.V., Dudareva M.O. A promising additive based on the $TiO_2-Bi_2O_3$ system for cement compositions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 100–103. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-100-103>

Развитие строительного материаловедения связано с разработкой и внедрением перспективных материалов, способных управлять процессом структурообразования цементной матрицы и регулированием свойств композитов. Внедрение нано- и тонкодисперсных добавок в матрицу цементного камня позволяет увеличивать прочностные характеристики цементного камня, уплотнять его структуру, повышать долговечность конструкций [1–8]. Авторами [6, 7] были рассмотрены цементные композиции, содержащие в своем составе нанотрубки, которые позволили увеличить начальную и марочную прочность цементного камня: на 40–70% до 26–32 МПа (начальная

прочность); на 15–24% до 72–78 МПа в марочном возрасте. Также выявлено повышение прочностных характеристик в раннем и марочном возрасте в цементных композициях, содержащих тонкодисперсный шлак, стабилизированный пластификатором [8]; отмечается улучшение физико-механических показателей тяжелого бетона при введении в состав смеси тонкодисперсной золы-уноса [9].

Авторами [10] установлено, что наночастицы на основе оксидов кремния, титана, алюминия, в различных соотношениях вводимые в состав цементного композита, препятствуют расслоению раствора, ускоряют процесс гидратации минералов цементно-

го клинкера, создают плотные гелеобразные структуры между цементными зернами, связывая их и формируя таким образом замкнутую структуру, которая способствует удержанию воды в цементном растворе. Отмечено, что водостойкость магнийфосфатного цемента можно повысить совместным введением наноразмерных оксидов алюминия (6%) и железа (2%) с жидким стеклом (1%). Оптимальное дозирование компонентов цементной системы значительно улучшило водостойкость раствора на 86, 101 и 96% после 28 дней погружения в воду соответственно. Это позволило заполнить микропоры и улучшить гидратацию структуры магнийфосфатного цементного камня [11].

Одним из достижений последних лет является получение фотокаталитически активных цементных композитов, в состав которых входят наночастицы оксида титана. Эти материалы получили широкое практическое распространение при производстве самоочищающихся конструкций для обеспечения чистоты воздушного пространства мегаполисов [12, 13]. Однако отмечено, что оксид титана проявляет фотокаталитический эффект только под действием ультрафиолетового излучения. В отличие от оксида титана титанаты висмута различного состава обладают фотокаталитической активностью в видимом диапазоне спектра и проявляют активность в реакциях разложения некоторых органических соединений: органических красителей (метиленовый синий, родамин Б), фенола, бисфенола А [14–16].

В связи с вышеизложенным в данной работе предполагается синтезировать по цитратной технологии тонкодисперсную добавку титаната висмута с последующим получением на ее основе стабилизированной суспензии и изучить ее влияние на физико-механические характеристики цементных составов.

Материалы и методы исследований

Объектом исследований является тонкодисперсная добавка на основе титанатов висмута, синтезированная по цитратной технологии из тетрахлорида титана TiCl_4 ($\rho=1,72$ г/мл) и оксида висмута (III) (ч.д.а.). При проведении синтеза необходимое количество тетрахлорида титана по каплям вносили в ледяную воду при постоянном промешивании магнитной мешалкой, затем к полученному раствору также по каплям добавляли раствор хлорида висмута (III), полученный предварительным растворением рассчитанной навески оксида висмута в соляной кислоте (1:1). Полученную смесь выпаривали до образования желтого гелеобразного осадка, который затем подвергали термической обработке в муфельной печи при температуре 400°C (15 мин) и 700°C (30 мин) до формирования конечного сероватого продукта реакции.

Для исследования формовались цементные образцы-кубы размером 20×20×20 мм из портландцемента ЦЕМ0 ООО «Холсим (Рус) Строительные материалы», химический и минералогический состав которого

Таблица 1
Table 1

Химический состав клинкера Chemical compositions of clinker

Содержание оксидов	%	Содержание оксидов	%
CaO	63	MgO	3,6
SiO ₂	20	SO ₃	0,58
Al ₂ O ₃	5,5	R ₂ O	1,3
Fe ₂ O ₃	5	ППП	1,1

Таблица 2
Table 2

Минералогический состав клинкера Mineralogical composition of clinker

Клинкерные минералы	%
C ₃ S	63
C ₂ S	11
C ₃ A	6
C ₄ AF	15

го представлен в табл. 1 и 2. Синтезированную тонкодисперсную добавку вводили в состав цементного композита в виде стабилизированной суспензии вместо воды затворения в количествах 10, 30, 50 г/л.

Для достижения стабилизации тонкодисперсных частиц добавки применялись химические и физические методы: добавление к системе поликарбоксилатного суперпластификатора Melflux 5581F и ультразвуковое диспергирование на приборе УЗДН-1 при частоте 44 кГц в термостатированных условиях ($t=25\pm 2^\circ\text{C}$). Физико-механические испытания материалов проводили в соответствии с действующими национальными и межгосударственными стандартами и методиками.

Результаты исследований

Добавка для цементных систем на основе титаната висмута относится к тонкодисперсным. Для получения высоких характеристик модифицированного материала требуется проводить тщательную гомогенизацию цементной системы с вводимым компонентом. Этот процесс достаточно сложный и трудноосуществимый без предварительной подготовки компонентов. В связи с ранее полученными данными [5, 6] предполагается добавку на основе системы $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ подвергать параллельному физическому и химическому воздействию. Физическое воздействие заключается в ультразвуковой обработке суспензии добавки. Химическое – введение пластификатора, который выступает в качестве стабилизатора суспензии. В данном исследовании использовался пластификатор на поликарбоксилатной основе Melflux 5581F.

Первоначально определяли сталагмометрическим методом (методом счета капель) значение критической концентрации мицеллообразования

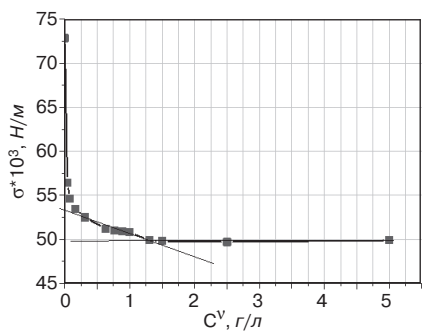


Рис. 1. Изотерма поверхностного натяжения поликарбоксилатного пластификатора
Fig. 1. Surface tension isotherm of polycarboxylate plasticizer

(ККМ) пластификатора, по которому можно судить, какое количество требуется вводить в воду затворения образцов, чтобы обеспечить улучшение физико-механических свойств цементного камня. Исходя из изотермы поверхностного натяжения пластификатора, представленной на рис. 1, следует, что значение ККМ для данного пластификатора составляет 1,3–1,5 г/л, где ν – стехиометрический коэффициент пластификатора.

Таким образом, было выбрано оптимальное значение концентрации поликарбоксилатного пластификатора для стабилизации суспензии добавки ниже точки ККМ, которое составило 1,2 г/л.

Для обеспечения равномерности распределения частиц добавки в объеме суспензии также проводилась ультразвуковая обработка в термостатированных условиях. УЗ-обработка способствует дополнительному измельчению частиц, интенсифицирует адсорбцию макромолекул пластификатора и продлевает нахождение частиц во взвешенном состоянии в объеме суспензии.

Подготовленные суспензии добавки с концентрациями 10, 30, 50 г/л вводились в цемент вместо воды затворения. Такой способ введения добавки в цементную матрицу позволяет более равномерно распределить ее в объеме. В ходе исследований были определены физико-механические и структурные характеристики образцов, которые представлены на рис. 2.

Из представленных данных следует, что в начальные сроки твердения интенсифицируются процессы гидратации, а также набор прочности модифицированными образцами по сравнению с образцом, содержащим только пластификатор: в первые и третьи сутки твердения – с 29 до 42 МПа (на 31, 38 и 45%) и с 53 до 70 МПа (на 28, 30 и 32%), а в марочном возрасте – с 83 до 97 МПа (на 2, 9 и 14%) для образцов с содержанием добавки 10, 30 и 50 г/л соответственно. Степень гидратации возросла на 2; 2,7 и 4,2% и на 7,5; 9 и 13,4% в первые и третьи сутки твердения соответственно. В марочном возрасте увеличение степени гидратации оценивается в 1,3; 4,7 и 5,6% для образцов с содержанием добавки 10, 30 и 50 г/л соот-

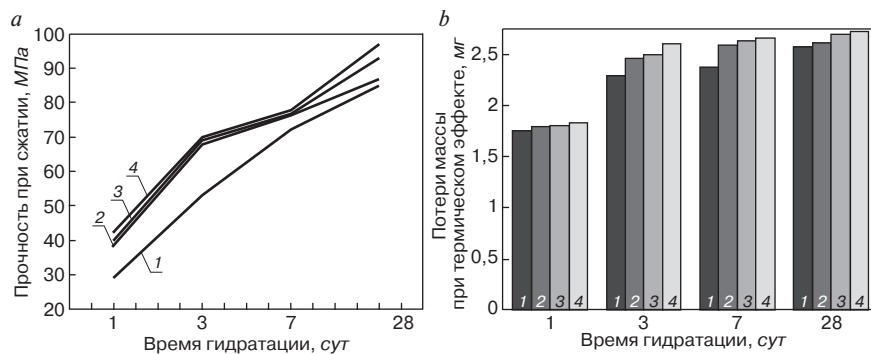


Рис. 2. Зависимость (а) прочности при сжатии и (б) потерь при прокаливании от времени гидратации образцов: 1 – контрольный (ПЦ+пластификатор); 2 – ПЦ+10 г/л добавки + пластификатор; 3 – ПЦ+30 г/л добавки + пластификатор; 4 – ПЦ+50 г/л добавки + пластификатор
Fig. 2. Dependence of (a) compressive strength and (b) calcination losses on the hydration time of the samples: 1 – control (PC+plasticizer); 2 – PC+10 g/l additives + plasticizer; 3 – PC+30g/l additives + plasticizer; 4 – PC+50 g/l additives + plasticizer

ветственно по сравнению с образцом, содержащим только цемент и пластификатор.

Полученные значения в марочном возрасте позволяют судить о возможности использования тонкодисперсной добавки на основе системы $TiO_2-Bi_2O_3$ в составе цементных композиций. Предполагается провести ряд исследований, направленных на стабилизацию цементной системы с синтезированной добавкой, изучение фотокаталитической активности и устойчивости к воздействию агрессивных сред рассматриваемых композиций, что позволит определить области применения нового материала на рынке современных строительных материалов.

Заключение и основные выводы

Проведенные теоретические исследования на базе литературных данных позволили рассматривать титанат висмута в качестве новой перспективной добавки для получения цементных композиций с уникальными свойствами. С помощью цитратного синтеза из тетраоксида титана и оксида висмута была синтезирована добавка, которая вводилась в цемент в виде стабилизированной суспензии вместо воды затворения. Полученные данные исследования физико-механических свойств, а также оценка степени гидратации образцов позволили сделать вывод о возможности применения новой перспективной добавки в составе цементных композиций. Отмечено повышение прочности при сжатии в марочном возрасте с 83 до 97 МПа для образцов с различным содержанием добавки по сравнению с образцом, содержащим только цемент и пластификатор. Аналогично возросла степень гидратации. В марочном возрасте увеличение степени гидратации оценивается в 1,3; 4,7 и 5,6%. Полученные данные позволяют судить о возможности применения добавки титанатов висмута в составе цементной композиции. Проведенные исследования являются плацдармом для изучения стабилизации добавки в объеме цементной матрицы, без которой нельзя продолжить исследования, направленные на изучение фотокаталитической активности и устойчивости к воздействию агрессивных сред рассматриваемых композиций. Намеченный

комплекс исследований позволит определить области применения нового материала на рынке современных строительных материалов.

Список литературы / References

- Elbony F., Gad S. Nanotechnology for energy efficient building materials embodied energy for the cement based building materials. *International Design Journal*. 2022. Vol. 12, pp. 273–283.
- Kaliprasanna S, Nanda S. Impact of ultrafine ground granulated blast furnace slag on the properties of high strength durable concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 970. DOI: 10.1088/1757-899X/970/1/012016.
- Нго Суан Хунг, Танг Ван Лам, Булгаков Б. И., Александрова О. В., Ларсен О. А. Влияние содержания золы-уноса на прочность бетонов на основе сульфатостойкого портландцемента // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 1. С. 51–58. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.51-58
- Ngo H., Tang L., Bulgakov B. I., Aleksandrova O.V., Larsen O. Effect of fly ash content on strength of concretes based on sulfate-resistant Portland cement. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo*. 2021. No. 1, pp. 51–58. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.51-58.01/2021
- Артамонова О.В., Шведова М.А. Влияние наноразмерных добавок на формирование структуры и прочностные характеристики цементного камня при длительном твердении // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 28. № 4. С. 159–164.
- Artamonova O.V., Shvedova M.A. The influence of nano-sized additives on the formation of the structure and strength characteristics of cement stone during long-term hardening. *Tekhnika i Tekhnologiya Silikatov*. 2021. Vol. 28. No. 4, pp. 159–164. (In Russian).
- Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O. Model and mechanism of carbon nanotube stabilization with plasticizer. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. DOI: 10.1051/mateconf/201819303050
- Samchenko S.V., Kozlova I.V., Zemskova O.V. Model and mechanism of stabilization of carbon nanotubes with plasticizer on the basis of sulfonated naphthalene formaldehyde resins. *Materials Science Forum, MSF*. 2018. Vol. 931, pp. 481–488. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.481
- Слдозян Р.Д., Михалева З.А., Ткачев А.Г. Физико-механические свойства композитов строительного назначения с углеродными наноструктурами // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26. № 2. С. 103–113. DOI: 10.18721/JEST.26208
- Slidozyan R.D., Mikhaleva Z.A., Tkachev A.G. Physico-mechanical properties of composites for construction purposes with carbon nanostructures. *Materialovedeniye. Energetika*. 2020. Vol. 26. No. 2, pp. 103–113. DOI: 10.18721/JEST.26208
- Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Zamelin D., Pepelyaeva A. Complex method of stabilizing slag suspension. In: *Murgul V., Pasetti M. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. EMMFT-2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_80
- Кансеитов А.Ю., Начинкин С.А., Акулова М.В. Влияние добавки золы-уноса на физико-химические свойства тяжелого бетона. *Экологические аспекты современных городов: Сборник материалов IX Межрегионального семинара*. Иваново, 2022. С. 25–27.
- Kanseitov A.Yu., Nachinkin S.A., Akulova M.V. The influence of the addition of fly ash on the physical and chemical properties of heavy concrete. *Environmental aspects of modern cities: Collection of materials from the IX interregional seminar*. Ivanovo. 2022, pp. 25–27. (In Russian).
- Maagi M.T., Lupyana S.D., Gu J. Effect of Nano-SiO₂, Nano-TiO₂ and nano-Al₂O₃ addition on fluid loss in oil-well cement slurry. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2019. Vol. 13 (1). 62. DOI: 10.1186/s40069-019-0371-y
- Feng H., Zhao X., Chen G., Miao C., Zhao X., Gao D., Sun G. The effect of nano-particles and water glass on the water stability of magnesium phosphate cement based mortar. *Materials*. 2019. Vol. 12 (22). 3755. DOI: 10.3390/ma12223755
- Wang J., Guo R., Bi Zh., Chen X., Hu X., Pan W. A review on TiO_{2-x}-based materials for photocatalytic CO₂ reduction. *Nanoscale*. 2022. DOI: 10.1039/D2NR02527B
- Bersch J., Flores-Colen I., Masuero A.B., Dal Molin D. Photocatalytic TiO₂-based coatings for mortars on facades: a review of efficiency, durability, and sustainability. *Buildings*. 2023. Vol. 13 (1). 186. DOI: 10.3390/buildings13010186
- Liua Y., Zhua G., Gaoa J., Hojamberdieva M., Zhub R., Wei X., Guoc Q., Liua P. Enhanced photocatalytic activity of Bi₄Ti₃O₁₂ nanosheets by Fe³⁺-doping and the addition of Au nanoparticles: Photodegradation of Phenol and bisphenol A. *Applied catalysis B: Environmental*. 2017. Vol. 200 (217), pp. 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.06.069>
- Correya A., Nampoori V. P. N., Mujeeb A. Microwave assisted synthesis of bismuth titanate nanosheets and its photocatalytic effects. *PeerJ Materials Science*. 2023. 5: e26. DOI: 10.7717/peerj-matsci.26
- Arumugam G.K., Durairaj S., Kalimuthu V., Anbazhagan V., Raju P., Dineshkumar S., Santhanam P., Ramalingam V., Rajaram R. Sunlight-irradiated bismuth titanate nanoparticles mediated degradation of methylene blue – Ecological perspectives. *Environmental Technology & Innovation*. 2022. Vol. 27. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102749

Д.А. АЮПОВ, канд. техн. наук (Ayupov_Damir@rambler.ru),
Р.И. КАЗАКУЛОВ, аспирант (Rauf-kazakulov@mail.ru)

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

Водно-минеральные суспензии для ремонтных битумных паст

Подобран оптимальный эмульгатор (цеолит) для приготовления битумных паст, главный минерал которого – клиноптилолит, обладающий как внешней, так и внутренней адсорбционной поверхностью, обеспечивает одновременно высокую гидрофильность и низкую водопотребность цеолита, что позволяет получать однородные вязкие суспензии с низким водотвердым отношением для битумных паст. Определены интервалы вязкости водно-минеральной суспензии, необходимые для получения битумной пасты, для эмульгаторов различной природы и дисперсности. Показано, что цеолитсодержащая порода (ЦСП) имеет наименьшую водопотребность среди выбранных эмульгаторов. Установлено влияние водоредуцирующего эффекта пластификатора на структуру битумных паст.

Ключевые слова: битум, битумные пасты, суспензии, цеолиты, гидроизоляция.

Для цитирования: Аюпов Д.А., Казакулов Р.И. Водно-минеральные суспензии для ремонтных битумных паст // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 104–108. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-104-108>

D.A. AYUPOV, Candidate of Sciences (Engineering) (Ayupov_Damir@rambler.ru),
R.I. KAZAKULOV, Graduate student (Rauf-kazakulov@mail.ru)
Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, 420043, Kazan, Russian Federation)

Water-Mineral Suspensions for Repair Bituminous Pastes

The optimal emulsifier (zeolite) for the preparation of bitumen pastes was selected, the main mineral of which is clinoptilolite, which has both an external and internal adsorption surface, provides both high hydrophilicity and low water demand of the zeolite, which makes it possible to obtain homogeneous viscous suspensions with a low water-solid ratio for bitumen pastes. The viscosity ranges of the water-mineral suspension necessary to obtain bituminous paste for emulsifiers of various nature and dispersion have been determined. It is shown that the zeolite-containing rock (ZSP) has the lowest water demand among the selected emulsifiers. The influence of the water-reducing effect of the plasticizer on the structure of bituminous pastes has been established.

Keywords: bitumen, bituminous pastes, suspensions, zeolites, waterproofing.

For citation: Ayupov D.A., Kazakulov R.I. Water-mineral suspensions for repair bituminous pastes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 104–108. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-104-108>

Производство и применение материалов на основе битумов в строительстве весьма разнообразно. Это битумо-минеральные композиции и асфальтобетоны, кровельные, гидроизоляционные, антикоррозионные и грунтовочные материалы, пасты и мастики для заделки швов, шпаклевки, герметики и др.

Особое место занимают ремонтные составы для кровельных и гидроизоляционных покрытий. Согласно данным Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) на текущий ремонт затрачивается ежегодно 2 млрд, а на капитальный – около 10 млрд р. Одним из наиболее уязвимых участков, зачастую требующих ремонта, является кровля. Также нередки протечки в межпанельных и других стыках, требующих гидроизоляции.

Все применяемые в настоящее время гидроизоляционные материалы (ГИМ) можно разделить по виду покрытия на два широких класса: шовные и бесшовные. Наиболее популярные сегодня ГИМ – рулонные – зачастую имеют негниющую основу и модифицированное вяжущее, однако являются шовными, и именно со стыков и примыканий начинается разру-

шение полотен, ведущее к ухудшению температурно-влажностного режима в помещениях, промерзанию отделочных покрытий, возрастанию нагрузки на покрытие. Покрытия имеют узкий температурный интервал эксплуатации, что в совокупности с механическими воздействиями предопределяет их низкие эксплуатационные характеристики, впоследствии приводящие к деформации и локальным разрывам. Поэтому применение бесшовной гидроизоляции крайне актуально.

По способу устройства бесшовную гидроизоляцию, в свою очередь, можно разделить на две категории: горячего и холодного нанесения. Главное преимущество горячих ГИМ, чаще всего мастик, заключается в их высокой адгезии. Они прекрасно взаимодействуют с разными поверхностями, надежно их склеивая. Однако на подготовку этих мастик к нанесению уходит значительное время и необходимо специальное оборудование, растет пожароопасность. Материалы холодного нанесения – эмульсии, пасты, мастики – удобны тем, что не требуют разогрева и практически не нуждаются в предварительной подготовке перед использованием.

Гидроизоляционные материалы холодного нанесения, в свою очередь, можно разделить на водные и материалы с использованием растворителя. Водные системы дешевле, в силу отсутствия в них растворителя они имеют высокие экологические параметры. Этими факторами и обусловлено широкое применение эмульсий. Перспективной альтернативой эмульсиям являются битумные пасты, относящиеся к классу бесшовных водных гидроизоляционных материалов холодного нанесения и представляющие собой дисперсные системы, в которых присутствует битум, вода и неорганический эмульгатор.

Битумные пасты применяют для устройства защитных гидроизоляционных покрытий, грунтовки изолируемых поверхностей, уплотнения стыков при кровельных работах на жилых и промышленных объектах, устройстве гидро- и пароизоляции на объектах жилого и промышленного строительства, поверхностной обработке дорожных покрытий, а также в качестве вяжущего для изготовления холодных мастик.

Битумные пасты имеют ряд преимуществ перед другими гидроизоляционными материалами. Например, при транспортировке эмульсий перевозится «водный балласт» в количестве 45–50%, который не участвует в образовании гидроизоляционного слоя, что негативно сказывается на экономическом эффекте от их применения. При использовании битумных паст после удаления воды получается наполненная система, что повышает прочность, тепло-, трещино-, атмосферостойкость, паро-, водонепроницаемость покрытий; увеличивается толщина гидроизоляционного слоя, что важно с точки зрения снижения его прокалываемости, а расслаиваемость паст ниже, чем у эмульсий. Из достоинств также нельзя не отметить их экологичность и отсутствие резкого запаха. Кроме того, битумные пасты удобны при ремонтных работах, в отличие от эмульсий.

Известно [1], что при смачивании твердых частиц эмульгатора масляной фазой (битумом) образуется эмульсия типа вода–масло (В/М), в случае же смачивания водой – эмульсия типа масло–вода (М/В). Битумные пасты представляют собой дисперсные системы первого типа.

Главный недостаток паст, ограничивающий их широкое применение, – повышенная гидрофильность, что негативно сказывается на влажностной усадке. Как уже отмечалось, важным также является тот факт, что избыток воды, необходимый для получения нужной вязкости пасты, сам по себе не участвует в образовании гидроизоляционного слоя, а лишь увеличивает издержки, связанные с его хранением и транспортировкой в составе пасты.

В качестве неорганического эмульгатора чаще всего используют гашеную и негашеную известь, глины, асбест. Есть значительное количество научных работ, в которых применялись также другие минеральные эмульгаторы: цемент [2], ПУН [3], трепел молотый [4], карбонатные шламы (ВСН 27–76 «Технические указания по применению битумных шламов для устройства защитных слоев на автомобильных дорогах») и др., однако широкого применения они не получили.

Пасты на основе гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$, как показала практика (П 77–79 «Руководство по устройству холодной асфальтовой гидроизоляции»), получаются неводостойкими из-за растворимости извести (~1,65 г/л) и имеют пониженную адгезию к большинству строительных материалов. Кроме того, гашеная известь имеет менее высокую эмульгирующую способность, чем негашеная.

Пасты на негашеной извести обладают чрезмерной вязкостью, а процесс эмульгирования во время гашения трудноуправляем и может приводить к получению неоднородного продукта. Кроме того, высококальциевая известь – довольно дефицитный продукт ввиду широкого использования по другим направлениям, например, для очистки кислых сточных вод [5].

Введение эмульгаторов с асимметричной формой частиц, например глин, считается более эффективным и ведет к предотвращению утончения жидкой прослойки между частицами эмульгатора (рис. 1).

Из рис. 1, а видно, что при раздвижке частиц эмульгатора жидкая прослойка между ними становится тоньше, радиус кривизны мениска растет. Частицы минерального эмульгатора при этом удерживаются

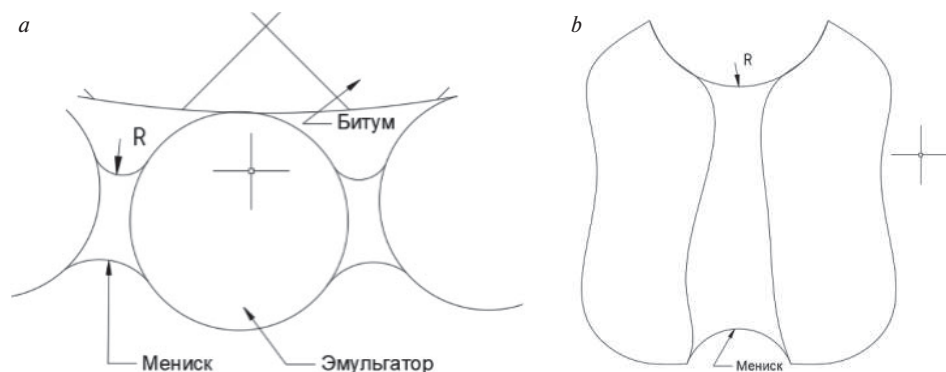


Рис. 1. Эмульгатор со сферической формой частиц (а) и с пластинчатой формой частиц (б)
Fig. 1. Emulsifier with spherical particle shape (a) and with plate-shaped particles (b)

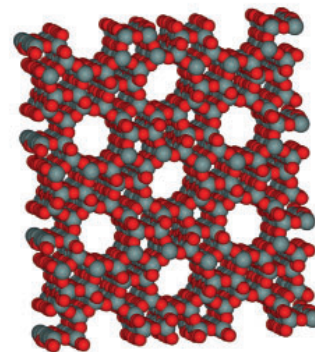


Рис. 2. Микропористое молекулярное строение цеолита
Fig. 2. Microporous molecular structure of zeolite

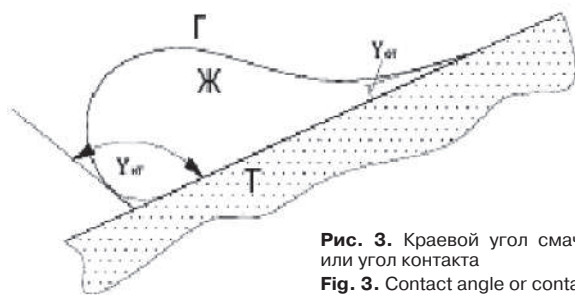


Рис. 3. Краевой угол смачивания, или угол контакта
Fig. 3. Contact angle or contact angle

живаются вместе за счет капиллярного стягивания пленкой жидкой прослойки. При применении пластинчатых эмульгаторов (рис. 1, б) толщина стягивающей пленки возрастает, что позволяет частицам эмульгатора лучше удерживаться на поверхности битумной дисперсной фазы.

Недостатком битумных паст на глиняных эмульгаторах является высокая водопотребность [6–9], связанная с тем, что главный глинистый минерал – каолинит – характеризуется только внешней адсорбционной поверхностью, его пористость обусловлена зазорами между контактирующими частицами. Поэтому для обеспечения необходимой вязкости пасты требуется большее количество воды.

Это справедливо и для битумно-асбестовых водных паст, гидрофильность эмульгатора в которых растет прямо во время приготовления водных суспензий с увеличением степени распушки волокон.

Авторами в качестве эмульгаторов для получения битумных паст предлагается применять распространенную в Республике Татарстан цеолитсодержащую породу (ЦСП). Каркасно-полостная микроструктура клиноптилолита – главного минерала цеолита, обладающая как внешней, так и внутренней адсорбционной поверхностью, позволяет максимально эффективно использовать сорбированную влагу для снижения вязкости суспензии, обеспечивает одновременно высокую гидрофильность и низкую водопотребность цеолита, что позволяет получать однородные вязкие суспензии с низким для битумных паст водотвердым отношением. Решетки цеолита – это открытые каналы, объединенные в полости. Диаметры каналов 2–8 Å, таким образом, они свободны для захвата молекул воды.

Для стабилизации дисперсных систем минеральными порошками необходима непрерывная оболочка – жидкая прослойка суспензии между частицами битумной дисперсной фазы. Еще одним аргументом за использование в качестве эмульгаторов частиц асимметричной формы при этом является гистерезис угла контакта, который важен для предотвращения смещения мениска суспензии в жидкой прослойке.

Чем сильнее капля суспензии способна деформироваться не перемещаясь, тем сильнее притяжение и значительнее когезия слоя порошка на поверхности. Практика показала, что это менее характерно для суспензий с гладкими сферическими частицами ми-

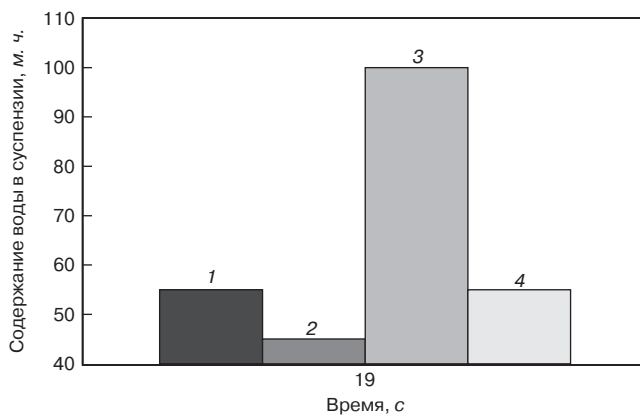


Рис. 4. Водопотребность эмульгаторов: 1 – глина; 2 – цеолит; 3 – асбест; 4 – пыль газоочистки
Fig. 4. Water requirement of emulsifiers: 1 – clay; 2 – zeolite; 3 – asbestos; 4 – gas purification dust

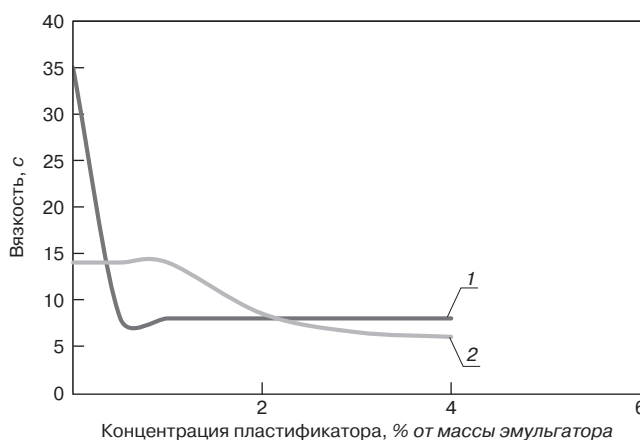


Рис. 5. Зависимость вязкости суспензии от концентрации пластификаторов: 1 – цеолит+С-3+вода 55 м. ч.; 2 – цеолит+поликарбоксилат-2+вода 60 м. ч.
Fig. 5. The dependence of the viscosity of the suspension on the concentration of plasticizers: 1 – Zeolite + C-3 + water 55 parts; 2 – zeolite+polycarboxylate-2+water 60 parts

нерального эмульгатора, такими как у ПУН, извести и т. д. Хорошие результаты получаются с порошками с пластинчатой формой частиц, такими как у глин, которые притягиваются друг к другу благодаря законам капиллярности.

К интенсификации процессов, протекающих на поверхности порошка, приводит увеличение удельной межфазной поверхности, что обычно способствует улучшению качества композиционных материалов. Однако гранулометрический состав порошковых эмульгаторов должен ограничиваться оптимальным пределом из-за проявления сил аутогезии. От размера частиц зависит удельная площадь межфазной поверхности. С уменьшением размеров частиц порошка усиливаются его негативные свойства: слеживаемость, прилипаемость, снижение текучести (сыпучести).

Ввиду гидрофобности битума водопотребность пасты напрямую зависит от водопотребности водно-минеральной суспензии, которая и была изучена (рис. 4).

Были приготовлены равновязкие составы на различных эмульгаторах и выявлено, что наименьшей водопотребностью обладает водно-цеолитовая суспензия.

После подбора эмульгатора необходимо было приготовить суспензию, отвечающую всем необходимым требованиям для получения качественных битумных паст.

В процессе эмульгирования битумов в воде необходима оптимальная концентрация порошкового эмульгатора, которая может составлять 30–200% по отношению к массе битума [10]. Столь большая разница объясняется различным составом и свойствами эмульгаторов.

Готовились суспензии двух типов, с различным количеством воды: первый – эмульгатор (ЦСП) 50 м. ч., вода 50 м. ч.; второй – ЦСП 50 м. ч., вода 55 м. ч. Приготовить суспензию с меньшим количеством воды не удалось, так как вся свободная вода адсорбируется эмульгатором. Излишек воды в суспензии также негативно влияет на приготавливаемую битумную пасту: расслаиваемость пасты растет, адгезия битума к частицам эмульгатора снижается.

Для увеличения водоредуцирующего эффекта в суспензиях можно использовать пластификаторы [11, 12]. Авторами для этих целей был применен суперпластификатор С-3, представляющий собой продукт конденсации нафталина, сульфата натрия, формальдегида и серной кислоты. Пластификаторы позволяют изменять показатели пластичности суспензии. В частности, при введении С-3 кратно уменьшается количество воды, необходимое для получения нужной вязкости суспензии, что видно на рис. 5.

При приготовлении водно-минеральных суспензий происходят процессы, сходные с процессами мокрого помола в цементных системах: физическая адсорбция и хемосорбция, в меньшей степени механохимическая активация цеолита и самого органического пластификатора, «втирание» последнего в микродефекты неорганических частиц. Авторы [13] считают, что результирующим эффектом является образование прочных валентных связей между молекулами пластификатора, конкретно С-3 (СП-1) и активными центрами измельчаемых твердых минеральных компонентов. Следует отметить, что эта гипотеза пока не нашла однозначного экспериментального подтверждения, механизм хемосорбции (прививки) до сих пор подробно не проанализирован ни теоретически (с помощью валентных схем), ни экспериментально – с помощью ИК-спектроскопии.

Список литературы

1. Тыртышов Ю.П., Печеный Б.Г., Курбатов В.Л., Ещенко А.И. Оптимизация составов, технологии приготовления битумных паст и мастик // *Строительные материалы*. 2013. № 1. С. 70–73.

Также исследовалась эффективность суперпластификатора на основе поликарбоксилата (ПК), применяемого для улучшения подвижности и снижения водотвердого отношения. Данная добавка, по описанию производителя, представляет собой продукт гомополимеризации непредельной кислоты в солевой форме. Добавка ПК позволяет уменьшить количество воды, или повысить степень подвижности, или получить оба эффекта.

Пластификаторы брались в следующих концентрациях: 0,5; 1; 2; 3; 4% от массы эмульгатора. Без применения пластификатора получилась высоковязкая суспензия, которая практически не проходила через отверстие вискозиметра, равное 4 мм. После введения пластификатора С-3 в концентрации 0,5% от массы эмульгатора вязкость уменьшилась более чем в три раза. Дальнейшее увеличение концентрации С-3 никак не влияло на вязкость суспензии. При использовании ПК приготовить текучую суспензию с той же концентрацией воды оказалось невозможным, так как вязкость при введении добавки увеличилась. Последующий рост концентрации пластификатора также не приводит к положительному результату. При увеличении количества воды на 10% без применения пластификатора условная вязкость составила 14 с. Концентрации в 0,5–1% не изменили подвижность суспензии, однако дальнейшее увеличение количества пластификатора позволило снизить вязкость до 6 с.

Выводы

1. Введение эмульгаторов с асимметричной формой частиц является более эффективным: предотвращается уменьшение толщины жидкой прослойки между частицами эмульгатора.
2. Каркасно-полостная микроструктура клиноптилолита – главного минерала цеолита, обладающая как внешней, так и внутренней адсорбционной поверхностью, обеспечивает одновременно высокую гидрофильность и низкую водопотребность цеолита, что позволяет получать однородные вязкие суспензии с низким для битумных паст водотвердым отношением.
3. Водопотребность ЦСП ниже относительно других испытываемых эмульгаторов.
4. Для увеличения водоредуцирующего эффекта в суспензиях целесообразно использовать суперпластификаторы. Например, применение С-3 снижает вязкость водно-минеральной суспензии более чем в три раза.

References

1. Tyrtyshev Yu.P., Pecheny B.G., Kurbatov V.L., Eshchenko A.I. Optimization of compositions, technologies for preparing bitumen pastes and mastics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 1, pp. 70–73. (In Russian).

2. Скориков С.В. Применение твердых эмульгаторов в строительных материалах на основе эмульгированных битумов // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2013. № 2 (35). С. 82–84.
3. Цокур О.С. Повышение ресурсосбережения утилизацией нефтесодержащих отходов реагентным способом с получением экологически безопасных продуктов. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет. 2015. 183 с.
4. Юхнеевский П.И., Широкий Г.Т. Строительные материалы и изделия. Минск: УП «Технопринт», 2004. 478 с.
5. Фридланд С.В., Галанцева Л.Ф., Нуруллин А.А. Применение известкового метода для очистки сточных вод от соединений фосфора // *Природообустройство*. 2009. № 5. С. 44–47.
6. Xiaohu Lu, Ulf Isacson. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens // *Fuel*. 1998. Vol. 77. No. 9–10, pp. 961–972. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00283-4)
7. Isacson U. Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers // *Journal of Materials Science*. 1999. Vol. 34. No. 15, pp. 3737–3745.
8. Xiaohu Lu, Ulf Isacson. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers // *Polymer Testing*. 2000. Vol. 20. No. 1, pp. 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00004-0)
9. Dubina S.I., Lobachev V.A., Dzhafarov R.M. et al. Composite rubber-polymer binder in the design and construction of Amur bridge. In: *Sinitsyn, A. (eds) Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. SES 2020: Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives*, pp. 119–128 https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_14
10. Абдрахманова Л.А., Хантимиров А.Г., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. Вып. 4 (115). С. 426–434.
11. Попченко С.Н. Гидроизоляция сооружений и зданий. Л.: Стройиздат, 1981. 304 с.
12. Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена // *Нанотехнологии в строительстве*. 2023. Т. 15. № 2. С. 110–116.
13. Киски С.С., Агеев И.В., Пономарев А.Н., Козеев А.А., Юдович М.М. Исследование возможности модификации карбоксилатных пластификаторов в составе модифицированных мелкозернистых бетонных смесей // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 8 (34). С. 42–46. DOI: 10.5862/MCE.34.6
2. Skorikov S.V. The use of solid emulsifiers in building materials based on emulsified bitumen. *Vestnik of the North Caucasus Federal University*. 2013. No. 2 (35), pp. 82–84. (In Russian).
3. Tsokur O.S. Povysheniye resursosberezheniya utilizatsiyey neftesoderzhashchikh otkhodov reagentnym sposobom s polucheniym ekologicheskii bezopasnykh produktov [Increasing resource conservation by recycling oil-containing waste using a reagent method to obtain environmentally friendly products]. Krasnodar: Kuban State Technological University. 2015. 183 p.
4. Yukhneevsky P.I., Shirokiy G.T. Stroitel'nyye materialy i izdeliya [Construction materials and products]. Minsk: Technoprint. 2004. 478 p.
5. Fridland S.V., Galantseva L.F., Nurullin A.A. Application of the lime method for treating wastewater from phosphorus compounds. *Prirodoobustroystvo*. 2009. No. 5, pp. 44–47. (In Russian).
6. Xiaohu Lu, Ulf Isacson. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. *Fuel*. 1998. Vol. 77. No. 9–10, pp. 961–972. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00283-4)
7. Isacson, U. Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers. *Journal of Materials Science*. 1999. Vol. 34. No. 15, pp. 3737–3745.
8. Xiaohu Lu, Ulf Isacson. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polymer Testing*. 2000. Vol. 20. No. 1, pp. 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00004-0)
9. Dubina S.I., Lobachev V.A., Dzhafarov R.M. et al. Composite rubber-polymer binder in the design and construction of Amur bridge. In: *Sinitsyn, A. (eds) Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. SES 2020: Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives*, pp. 119–128 https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_14
10. Abdrakhmanova L.A., Khantimirov A.G., Nizamov R.K., Khozin V.G. Wood-polymer nanomodified polyvinyl chloride building composites. *Vestnik of MUCE*. 2018. Vol. 13. Iss. 4 (115), pp. 426–434. (In Russian).
11. Popchenko S.N. Gidroizolyatsiya sooruzheniy i zdaniy [Waterproofing of structures and buildings]. Leningrad: Stroyizdat. 1981. 304 p.
12. Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Study of the properties of nanomodified wood-polymer composites based on polyethylene. *Nanotekhnologii v Stroitel'stve*. 2023. Vol. 15. No. 2, pp. 110–116. (In Russian).
13. Kiski S.S., Ageev I.V., Ponomarev A.N., Kozeev A.A., Yudovich M.M. Study of the possibility of modifying carboxylate plasticizers in the composition of modified fine-grained concrete mixtures. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8 (34), pp. 42–46. DOI: 10.5862/MCE.34.6



КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Шестнадцатая международная специализированная выставка

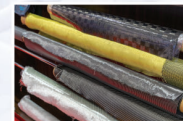
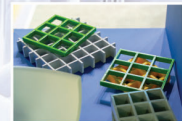
26 - 28 марта 2024

Москва, ЦВК «Экспоцентр»,
павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК), т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



выставка
участник
системы

независимый
выставочный
аудит

Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

YouTube [youtube.com/user/compoexporussia](https://www.youtube.com/user/compoexporussia) @compoexporus @ocompo

Организатор:



ПОЛИУРЕТАНЭКС

Пятнадцатая международная специализированная выставка

26 - 28 марта 2024

Москва, ЦВК «Экспоцентр»,
павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства полиуретанов (добавки, красители, катализаторы, наполнители, и т.д.)
- Оборудование и станки для производства и переработки полиуретанов (расходомертия, шестереночные, оседагональные (шнековые), шлепперные насосные установки, обрабатывающие станки, и т.д.)
- Конечная продукция (контактное уплотнение при литье, фильтры и т.д.)
- Услуги (лабораторные испытания, охрана здоровья и безопасность, переработка, защита окружающей среды, научные разработки)
- Техническое обслуживание оборудования
- Тестовое оборудование

Специальный раздел выставки:
КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



выставка
участник
системы

независимый
выставочный
аудит

Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@polyurethanex.ru | Сайт: www.polyurethanex.ru

YouTube [youtube.com/user/polyexporus](https://www.youtube.com/user/polyexporus) @polyexporus @ocompo

Организатор:



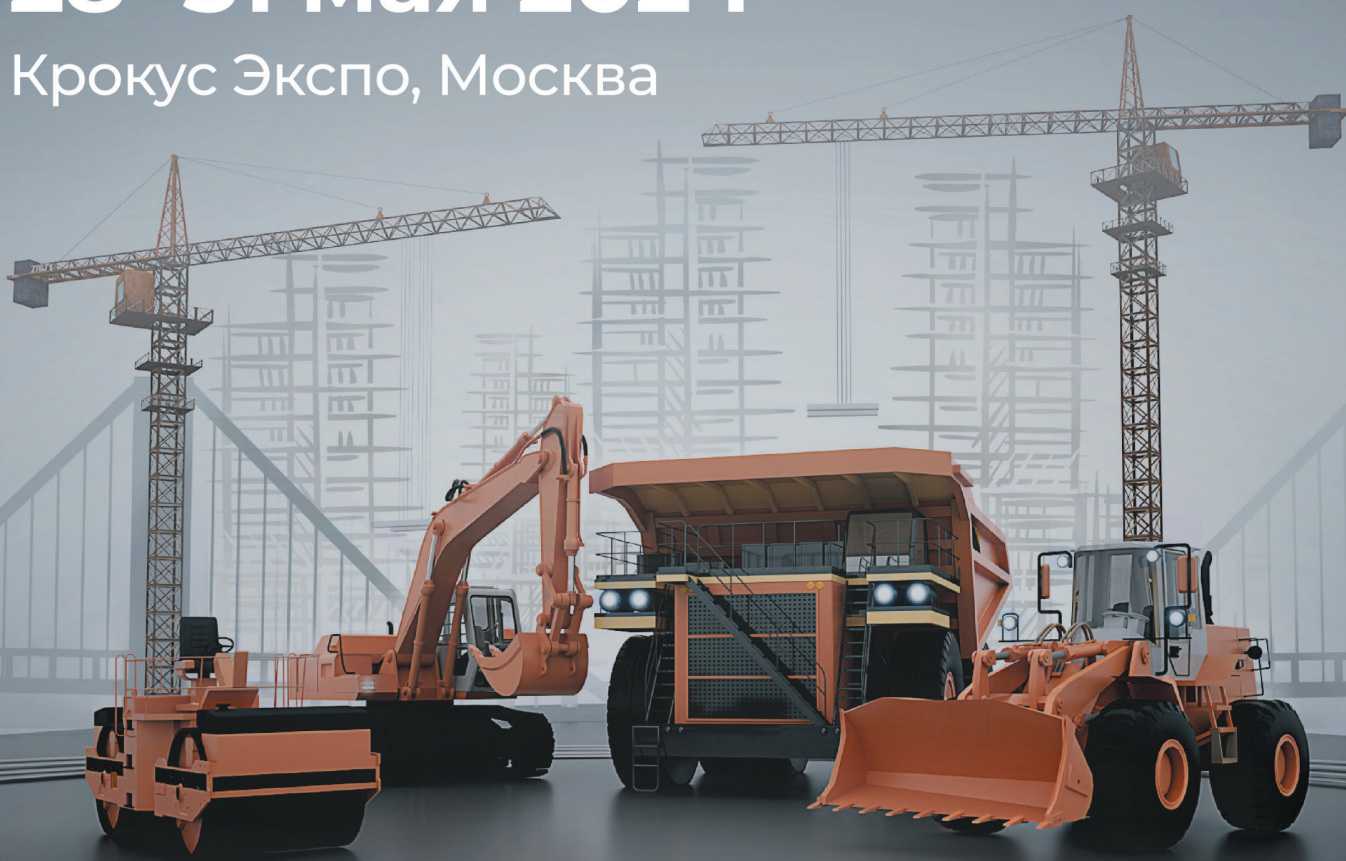
СТТ ЭХРО

ОСНОВА ВАШЕГО УСПЕХА

Главная выставка строительной
техники и технологий в России

28–31 мая 2024

Крокус Экспо, Москва



Разделы выставки:

- Строительная техника и транспорт
- Производство строительных материалов
- Добыча, обогащение и транспортировка полезных ископаемых
- Запчасти и комплектующие для машин и механизмов. Смазочные материалы



ctt-expo.ru

Организатор

SIGMA
ЭХРО

При поддержке

Крокус Экспо
Международный выставочный центр