

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 2022 г. (808)



Главная выставка строительной техники
и технологий в России

23—26 мая 2023

Крокус Экспо, Москва

СТТ
EXPO



www.ctt-expo.ru

При поддержке

КРОКУС ЭКСПО
Международный выставочный центр

ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ

- Строительная техника и транспорт
- Производство строительных материалов
- Добыча, обогащение и транспортировка полезных ископаемых
- Запчасти и комплектующие для машин и механизмов. Смазочные материалы

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1

Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1

Свид. о регистрации ПИ № 77–1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)

Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,
Russian Science Citation Index
на платформе Web of Science

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

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 11

Основан в 1955 г.

(808) Ноябрь 2022 г.

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

Бетоны: наука и практика

И.В. БЕССОНОВ, А.Д. ЖУКОВ, С.И. БАЖЕНОВА, М.А. КОНЮХОВ

Морозостойкость стен зданий из легкого бетона..... 4

О.А. ЛАРСЕН, А.М. БАХРАХ

Изменение удельного электрического сопротивления токопроводящего бетона в процессе твердения..... 10

25 лет КНАУФ–суперлисту в России (Информация) 15

О.В. АЛЕКСАНДРОВА, Б.И. БУЛГАКОВ, С.В. ФЕДОСОВ, НГУЕН ДЫК ВИНЬ КУАНГ, О.Б. ЛЯПИДЕВСКАЯ

Применение белого кварцевого песка для получения бетонов высокой прочности..... 19

А.Д. ДЕНИСОВА, А.С. ШЕХОВЦОВ, Е.Д. КУЖМАН

Влияние ширины композиционного материала, применяемого при усилении железобетонных конструкций, на его работу при растяжении..... 26

Современные вяжущие материалы

С.В. САМЧЕНКО, М.А. АБРАМОВ, А.Б. ОСМАНОВ

Анализ изменения характеристик активированного цемента с использованием дезинтеграторной технологии... 32

А.Д. ЖУКОВ, И.В. БЕССОНОВ, А.В. КУЛАПИН, А.А. МЕДВЕДЕВ, Б.А. ДЕМИССЕ, Р.С. ПОУДЕЛ

Фасадные штукатурные системы с применением модифицированного вяжущего..... 37

И.В. КОЗЛОВА, О.В. ЗЕМСКОВА, Н.А. ЛЕКАНОВ

Варианты введения тонкодисперсной добавки на основе перлита в цементные композиции..... 42

А.Ф. ГОРДИНА, И.С. ПОЛЯНСКИХ, А.Т. ГАФИПОВ, Н.В. КУЗЬМИНА, И.А. ПУДОВ

Особенности формирования структуры и свойств фторангидридных материалов..... 50

Материалы для дорожного строительства

С.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ, Т.Ч. ДО

Самовосстановление асфальтобетона с использованием инкапсулированного модификатора..... 58

А.Ф. ГАЛКИН, В.Ю. ПАНКОВ, Е.О. ЖИРКОВА

Расчет термического сопротивления дорожной одежды..... 70

Материалы и технологии

Т.А. МАЦЕЕВИЧ, А.А. АСКАДСКИЙ, С.А. МЕРКУЛОВ

Прогнозирование коэффициента оптической чувствительности по напряжению многослойных полимерных материалов..... 76

Б.А. ЕФИМОВ, А.Ю. УШАКОВ, А.М. ТЯКИНА, А.М. МИНАЕВА

Структура и теплофизические характеристики газонаполненных полимеров..... 81

А.С. ПИЛИПЕНКО, М.Б. КАДДО, М.О. АСАМАТДИНОВ, Б.Б. ТУРГАНБАЕВ

Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан..... 86

И.В. СТЕПИНА, М. СОДОМОН

Совместимость модифицированного растительного сырья с органополимерными связующими..... 92

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

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 11

Founded in 1955 (808) November 2022

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

Concretes: science and practice

| | |
|---|----|
| I.V. BESSONOV, A.D. ZHUKOV, S.I. BAZHENOVA, M.A. KONYUKHOV | |
| Frost Resistance of the Walls of Buildings Made of Light Concrete | 4 |
| O.A. LARSEN, A.M. BAHRAH | |
| Change in the Specific Electrical Resistance of Conductive Concrete During the Hardening Process | 10 |
| 25 years of KNAUF-Superlist in Russia (Information) | 15 |
| O.V. ALEKSANDROVA, B.I. BULGAKOV, S.V. FEDOSOV, NGUYEN DUC VINH QUANG, O.B. LYAPIDEVSKAYA | |
| Use of White Quartz Sand for High-Strength Concrete | 19 |
| A.D. DENISOVA, A.S. SHEKHOVTSOV, E.D. KUZHMAN | |
| Width Effect of Composite Material on its Tensile Behavior at Strengthening Reinforced Concrete Structures | 26 |

Modern binding materials

| | |
|--|----|
| S.V. SAMCHENKO, M.A. ABRAMOV, A.B. OSMANOV | |
| Analysis of Changes in the Characteristics of Activated Cement Using Disintegrator Technology | 32 |
| A.D. ZHUKOV, I.V. BESSONOV, A.V. KULAPIN, A.A. MEDVEDEV, B.A. DEMISE, R.S. POUDEL | |
| Facade Plastering Systems Using a Modified Binder | 37 |
| I.V. KOZLOVA, O.V. ZEMSKOVA, N.A. LEKANOV | |
| Options for the Introduction of a Finely Dispersed Additive Based on Perlite into Cement Mixtures | 42 |
| A.F. GORDINA, I.S. POLYANSKIKH, A.T. GAFIPOV, N.V. KUZMINA, I.A. PUDOV | |
| Structure Formation Aspects for Fluorohydrate-Based Materials | 50 |

Materials for road construction

| | |
|---|----|
| S.S. INOZEMTSEV, E.V. KOROLEV, T.Ch. DO | |
| Self-Healing of Asphalt Concrete Using Encapsulated Modifier | 58 |
| A.F. GALKIN, V.Yu. PANKOV, E.O. ZHIRKOVA | |
| Calculation of Thermal Resistance of Pavement | 70 |

Materials and technologies

| | |
|--|----|
| T.A. MATSEEVICH, A.A. ASKADSKII, S.A. MERKULOV | |
| Prediction of the Stress-Optical Coefficient of Multilayer Polymer Materials | 76 |
| B.A. EFIMOV, A.Yu. USHAKOV, A.M. TYAKINA, A.M. MINAEVA | |
| Structure and Thermophysical Characteristics of Gas-Filled Polymers | 81 |
| A.S. PILIPENKO, M.B. KADDO, M.O. ASAMATDINOV, B.B. TURGANBAEV | |
| Ceramic Insulated Blocks Based on Local Raw Materials of the Republic of Karakalpakstan | 86 |
| I.V. STEPINA, M. SODOMON | |
| Compatibility of Modified Plant Raw Materials with Organopolymer Binders | 92 |

Главный редактор:**ЮМАШЕВА Е.И.,**

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:**РЕСИН В.И.,**

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

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

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

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

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

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

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

КОРОЛЕВ Е.В.,

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

КОТЛЯР В.Д.,

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

КРИВЕНКО П.В.,

д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

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

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

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

РУДАКОВ О.Б.,

д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

ТРАВУШ В.И.,

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

ФЕДОСОВ С.В.,

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

СТРОКОВА В.В.,

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

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editor-in-chief**YUMASHEVA E.,**

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board**RESIN V.,**

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

BURYANOV A.,

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

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

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

EROFEEV V.,

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

KOROLEV E.,

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

KOTLYAR V.,

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

KRIVENKO P.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,

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

LESOVIK V.,

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

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

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

PUKHARENKO Yu.,

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

RUDAKOV O.B.,

Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

STROKOVA V.

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

TRAVUSH V.,

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

FEDOSOV S.,

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

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

SHEBL S.M.,

Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,

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

SHTACKELBERG D.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

И.В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);
А.Д. ЖУКОВ², канд. техн. наук (lj211@yandex.ru),
С.И. БАЖЕНОВА², канд. техн. наук (bazhenovasi@mgsu.ru),
М.А. КОНЮХОВ², магистрант (maximkonyukhoff@gmail.com)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

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

Морозостойкость стен зданий из легкого бетона

В России активно применяются блоки из ячеистого бетона автоклавного твердения в каркасных зданиях в качестве самонесущих наружных стен (в некоторых случаях с наружным утеплением), а также в малоэтажном бескаркасном строительстве. Эксплуатационная стойкость этих блоков определяется свойствами бетона и связана с такими характеристиками, как водонепроницаемость, капиллярное всасывание и морозостойкость. Цель исследований заключалась в экспериментальном изучении стойкости фрагментов кладки к циклическим температурно-влажностным воздействиям при одностороннем замораживании и разработке рекомендаций по оценке морозостойкости. Впервые в качестве нормируемых параметров оценки морозостойкости кладок из легких бетонов предложено использовать следующие показатели: прочность сцепления блоков со штукатурным раствором, прочность на вырыв химически закрепленных анкеров (разрушающие методы), а также скорость прохождения ультразвукового импульса через толщу кладки (неразрушающий метод). Получены физико-механические и теплофизические характеристики теплоизоляционно-конструкционных бетонов. Установлены зависимости теплозащитных качеств от степени увлажнения материала, а также прочности от условий оттаивания образцов в воде и в воздушной среде. Отработаны особенности проведения испытаний на фрагментах кладок в процессе циклических температурно-влажностных воздействий при одностороннем замораживании. Результаты применимы при разработке и актуализации нормативных, технических и организационно-методических документов по проектированию стеновых кладок из легкобетонных блоков, в частности при разработке национального стандарта «Кладки стеновые из легкобетонных блоков. Методы определения морозостойкости».

Ключевые слова: нормируемые параметры, тепловая защита, морозостойкость, ячеистый бетон, одностороннее замораживание.

Для цитирования: Бессонов И.В., Жуков А.Д., Баженова С.И., Конюхов М.А. Морозостойкость стен зданий из легкого бетона // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-4-9>

I.V. BESSONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru); A.D. ZHUKOV², Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru), S.I. BAZHENOVA², Candidate of Sciences (Engineering) (bazhenovasi@mgsu.ru), M.A. KONYUKHOV², Master student (maximkonyukhoff@gmail.com)

¹ Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

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

Frost Resistance of the Walls of Buildings Made of Light Concrete

In Russia, autoclave-hardened cellular concrete blocks are actively used in frame buildings as self-supporting external walls (in some cases with external insulation), as well as in low-rise frameless construction. The operational durability of these blocks is determined by the properties of concrete and is associated with such characteristics as water resistance, capillary suction and frost resistance. The purpose of the research was to experimentally study the resistance of masonry fragments to cyclic temperature and humidity influences during unilateral freezing and to develop recommendations for assessing frost resistance. For the first time, as the normalized parameters for assessing the frost resistance of light concrete masonry, it is proposed to use the following indicators: the adhesion strength of blocks with plaster mortar, the tear strength of chemically fixed anchors (destructive methods), as well as the speed of passage of an ultrasonic pulse through the masonry thickness (non-destructive method). The physico-mechanical and thermophysical characteristics of thermal insulation and structural concrete are obtained. The dependences of heat-protective qualities on the degree of moisture content of the material, as well as strength on the conditions of thawing of samples in water and in air are established. The features of conducting tests on fragments of masonry, in the process of cyclic temperature and humidity effects during unilateral freezing are worked out. The results are applicable in the development and updating of regulatory, technical, organizational and methodological documents for the design of wall masonry made of light concrete blocks, in particular, in the development of the national standard "Wall masonry made of light concrete blocks. Methods for determining frost resistance".

Keywords: normalized parameters, thermal protection, frost resistance, cellular concrete, unilateral freezing.

For citation: Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bazhenova S.I., Konyukhov M.A. Frost resistance of the walls of buildings made of light concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-4-9>

В связи с повышением нормативных требований к уровню тепловой защиты зданий спрос на легкие бетоны с высокими теплозащитными характеристиками, в частности на сверхлегкие теплоизоляционные бетоны с плотностью до 500 кг/м³, постоянно увеличивается. Результаты исследований и опыт

применения показывают, что теплоизоляционные легкие бетоны существенно более надежны в обслуживании по сравнению с обычными изоляционно-конструкционными материалами [1–3].

Существует острая необходимость улучшения показателей теплотехнического качества этих бето-

нов в ограждающих конструкциях и их эксплуатационной стойкости [4–7]. Направлениями повышения качества и эксплуатационной стойкости изделий являются: использование добавок модификаторов, полимеров, использование высокотехнологичного оборудования, современных методов расчета и проектирования [8–11].

С середины XX в. мировые темпы развития легких бетонов возросли – нижний предел прочности высокопрочных бетонов составил 30 МПа. Разработка революционных технологий привела к всеобщему росту прочности легких бетонов.

В России начиная с 2000 г. активно применяются блоки из ячеистого бетона автоклавного твердения в каркасных зданиях в качестве самонесущих наружных стен (в некоторых случаях с наружным утеплением), а также в малоэтажном бескаркасном строительстве [12–14].

Стойкость этих блоков определяется свойствами бетона и связана с такими характеристиками, как водонепроницаемость, капиллярное всасывание и морозостойкость.

Действующий стандарт ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» устанавливает следующие методы определения морозостойкости.

А. Базовые методы при многократном замораживании и оттаивании:

– первый – для всех видов бетонов, кроме бетонов дорожных и аэродромных покрытий и бетонов конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия минерализованной воды;

– второй – для бетонов дорожных и аэродромных покрытий и для бетонов конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия минерализованной воды.

Б. Ускоренные методы при многократном замораживании и оттаивании:

– второй – для всех видов бетонов, кроме бетонов дорожных и аэродромных покрытий и бетонов конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия минерализованной воды, легких бетонов марок по средней плотности менее D1500;

– третий – для всех видов бетонов, кроме легких бетонов марок по средней плотности менее D1500.

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании стойкости фрагментов кладки к циклическим температурно-влажностным воздействиям при одностороннем замораживании, а также в получении сравнительных значений морозостойкости при оттаивании образцов погружением в воду и на воздухе с относительной влажностью 97%.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования приняты блоки из ячеистого бетона автоклавного твердения. Испытания проводили методом одностороннего замораживания фрагментов кладок из указанных видов бетонов (применительно к ГОСТ 7025–91 «Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости»).

Определены физико-механические характеристики: прочность сцепления с кладочным раствором,



Рис. 1. Подготовка образцов-кубов и блоков из ячеистого бетона для изготовления фрагментов кладок, предназначенных для проведения испытаний на морозостойкость

Fig. 1. Preparation of samples-cubes and blocks of cellular concrete for the manufacture of masonry fragments intended for testing for frost resistance



Рис. 2. При устройстве кладки в стену устанавливали датчики температуры (термохроны). Правая половина фрагмента была оштукатурена, левая – не оштукатурена. Одновременно с основными фрагментами были подготовлены контрольные фрагменты кладок

Fig. 2. When laying the masonry, temperature sensors (thermochrones) were installed in the wall. The right half of the fragment was plastered, the left half was not plastered. Simultaneously with the main fragments, control fragments of masonry were prepared

с клеевой композицией, с наружной штукатуркой, а также прочность на вырыв химических анкеров. Параллельно проведены испытания морозостойкости на образцах-кубах, причем с двумя вариантами оттаивания – в воде (ГОСТ 10060–2012) и в воздушной среде с относительной влажностью 97% (ГОСТ 31359–2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия»). Проведены экспериментальные определения теплофизических характеристик.

Впервые в качестве нормируемых параметров оценки морозостойкости кладок из легких бетонов предложено использовать следующие параметры: прочность сцепления блоков со штукатурным раствором; прочность на вырыв химических анкеров (разрушающие методы); скорость прохождения ультразвукового импульса через толщу кладки (неразрушающий метод).

Исследования выполнены в рамках реализации НИОКР. Договор № 124/2019. Тема «Исследование нормируемых параметров (морозостойкости) стеновых кладок из легкогобетонных блоков и разработка методики ее контроля». НИИСФ РААСН. 2019 г.

Результаты и обсуждение

Установлено, что средняя плотность образцов ячеистого бетона автоклавного твердения, исследованных в эксперименте, составляла 443 кг/м³. Теплопроводность образцов ячеистого бетона автоклавного твердения определяли как в состоянии естественной влажности, так и в сухом состоянии. По полученным значениям влажности и соответствующим им значениям теплопроводности рассчитывали значения приращения теплопроводности на 1% влажности материала по формуле:

$$\Delta\lambda = (\lambda_w - \lambda_0)/w,$$

где $\Delta\lambda$ – приращение теплопроводности на 1% влажности, Вт/(м·°С%); λ_w – теплопроводность образца во влажном состоянии, Вт/(м·°С); w – влажность образца, мас. %.

Теплопроводность в сухом состоянии составила 0,14 Вт/(м·°С). При определении теплопроводности при условиях эксплуатации А и Б использованы данные сорбционных свойств ячеистого бетона и фор-



Рис. 3. Проведены испытания прочности на вырыв химических анкеров на контрольном образце фрагмента кладки и по завершении циклических воздействий
Fig. 3. Tests of the pull-out strength of chemical anchors were carried out on a control sample of a masonry fragment and upon completion of cyclic impacts

Таблица 1

Table 1

Результаты экспериментальных определений прочности сцепления (адгезии) кладки блоков из ячеистого бетона со слоем наружной штукатурки
The results of experimental determinations of the strength of adhesion (adhesion) of masonry blocks of cellular concrete with a layer of external plaster

| Фрагмент кладки из блоков | Среднее значение силы отрыва, кН | Средняя прочность сцепления (адгезия), МПа |
|---|----------------------------------|--|
| Контрольный фрагмент | 1,19 | 0,48 |
| Фрагмент, прошедший 150 циклов температурно-влажностных воздействий | 0,88 | 0,35 |

Таблица 2

Table 2

Результаты экспериментальных определений прочности сцепления (адгезии) и кладки блоков из ячеистого бетона с кладочным раствором и клеевой композицией
The results of experimental determinations of the strength of adhesion (adhesion) and masonry blocks of cellular concrete with masonry mortar and adhesive composition

| Вид сцепляющего слоя кладки | Вид кладки | Среднее значение прочности сцепления (адгезия), МПа |
|-----------------------------|--------------------------------|---|
| Клеевая композиция | Контрольный фрагмент | 0,27 |
| | Фрагмент, прошедший 150 циклов | 0,21 |
| Кладочный раствор | Контрольный фрагмент | 0,17 |
| | Фрагмент, прошедший 150 циклов | 0,4 |

Примечание. Характер отрыва – во всех случаях – по телу бетона.

мула для приращения теплопроводности $\Delta\lambda$. Сорбция ячеистого бетона при влажности воздуха 80% составила 1,6%, при 97% – 6,6%. Теплопроводность при условиях эксплуатации А и Б равна соответственно: $\lambda_A=0,156$; $\lambda_B=0,206$.

Метод испытания морозостойкости фрагментов кладок блоков из ячеистого бетона при одностороннем замораживании заключается в устройстве кладок в поворотной запорной раме с последующим проведением циклов температурно-влажностных

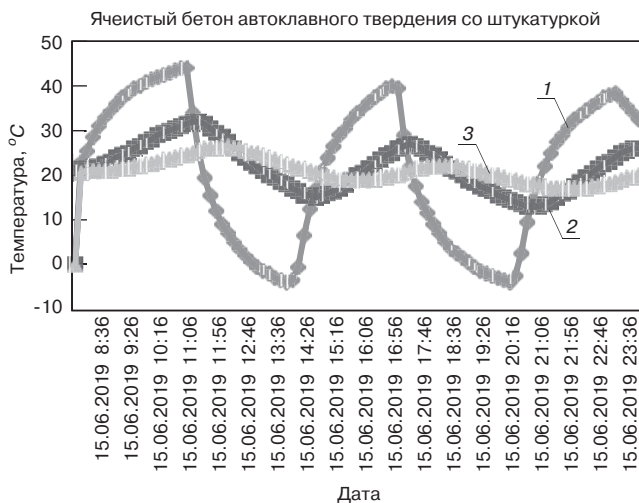


Рис. 4. Графики распределения температуры в толщине кладки при проведении испытаний на морозостойкость методом одностороннего замораживания в холодильно-дождевой установке ХДУ-0.2: 1 – 4 см; 2 – 8 см; 3 – 14 см

Fig. 4. Graphs of temperature distribution in the thickness of the masonry during testing for frost resistance by the method of one-sided freezing in the refrigeration and rain installation ХДУ-0.2: 1 – 4 cm; 2 – 8 cm; 3 – 14 cm

воздействий на поверхность фрагмента. Цикл состоит из следующих переделов: увлажнение в течение 15 мин; замораживание при -25°C в течение 3 ч; нагрев до $+70^{\circ}\text{C}$ при ИК- и УФ-облучении в течение 2 ч 45 мин. Количество циклов – 150. Нагревание поверхности фрагмента конструкции посредством лучистого действия нагревательного прибора моделирует солнечное облучение, увлажнение моделирует атмосферные осадки, а замораживание – воздействие отрицательной температуры. Длительность и интенсивность воздействия температуры и влаги подобрана таким образом, чтобы экспериментальное воздействие соответствовало циклическим явлениям заморозок–оттепель, что обуславливает промерзание и оттаивание наружной поверхности фрагмента кладки не менее чем на 80 мм. Контролируемые параметры: прочность сцепления блоков со

штукатурным раствором, с кладочным раствором и клеевой композицией; прочность на вырыв химического анкера.

Для устройства химических анкеров была применена технология инъектирования MIT-SPE Plus (шпилька резьбовая диаметром М10, класс прочности 4,8). В результате экспериментальных определений прочности на вырыв химического анкера в кладке из блоков из ячеистого бетона получено среднее значение прочности анкера на вырыв у контрольного фрагмента 3,97 кН; для фрагмента, прошедшего 150 климатических циклов, – 3,4 кН.

На стадии обработки и систематизации полученных экспериментальных данных исследованы зависимости степени изменения физико-механических параметров блоков из ячеистого бетона автоклавного твердения при воздействии на них периодического знакопеременного перепада температуры и увлажнения.

Морозостойкость образцов при объемном замораживании в воздушной среде и оттаивании в воде оценивали по изменению прочности при сжатии, а также внешнего вида образцов-кубов. В качестве контрольных испытывали образцы-кубы в сухом состоянии, выдержанные в воде в течение двух суток, а также выдержанные в воде в течение двух суток и затем над водой не менее двух суток.

Морозостойкость фрагментов кладок при одностороннем замораживании оценивали по изменению прочности сцепления (адгезии) блоков со слоем штукатурки, с кладочным раствором, клеевой композицией, а также прочности на вырыв химических анкеров.

Графики изменения температуры на поверхности и в толще кладки при проведении испытаний на морозостойкость методом одностороннего замораживания в холодильно-дождевой установке ХДУ-0.2 представлены на графиках рис. 4.

По результатам анализа данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, установле-

Таблица 3
Table 3

Изменение прочности образцов ячеистого бетона автоклавного твердения после циклов замораживания-оттаивания при оттаивании с полным погружением в воду по отношению к контрольным, выдержанным в воде в течение двух суток

Change in the strength of samples of autoclaved cellular concrete after freeze-thaw cycles, when thawed with complete immersion in water in relation to control ones kept in water for two days

| Циклы замораживания-оттаивания | Среднее значение прочности при сжатии, МПа | Среднее значение прочности при сжатии контрольных образцов, МПа | Изменение прочности по отношению к контрольному образцу, % |
|--------------------------------|--|---|--|
| 1 | 2,41 | 2,19 | +10 |
| 3 | 2,24 | | +2,3 |
| 5 | 2,17 | | -0,9 |
| 10 | 1,84 | | -16 |
| 15 | 1,78 | | -18,7 |

Примечание. После 20-го цикла образцы имеют признаки разрушения: шелушение по граням, потеря первоначальных геометрических параметров.

Таблица 4
Table 4

Изменение прочности образцов ячеистого бетона автоклавного твердения после циклов замораживания-оттаивания при оттаивании в воздушной среде с относительной влажностью воздуха $95\pm 2\%$ по отношению к контрольным, выдержанным в воде в течение двух суток и затем над водой в течение двух суток
Change in the strength of samples of autoclaved cellular concrete after freeze–thaw cycles, when thawed in an air environment with a relative humidity of $95\pm 2\%$ relative to the control, kept in water for two days and then above water for two days

| Циклы замораживания-оттаивания | Среднее значение прочности при сжатии, МПа | Среднее значение прочности при сжатии контрольных образцов, МПа | Изменение прочности по отношению к контрольному образцу, % |
|--------------------------------|--|---|--|
| 5 | 2,33 | 2,17 | +7,4 |
| 10 | 2,32 | | +6,9 |
| 15 | 2,31 | | +6,5 |
| 20 | 2,15 | | -0,9 |
| 30 | 2,04 | | -6 |
| 40 | 1,94 | | -10,6 |
| 50 | 1,91 | | -12 |
| 75 | 1,80 | | -17,1 |
| 100 | 1,71 | | -21,2 |

Примечание. После 140-го цикла образцы имеют признаки разрушения: шелушение по граням, потеря первоначальных геометрических параметров.

но, что после проведения 150 циклов одностороннего замораживания—оттаивания—нагрева—увлажнения прочность сцепления блоков из ячеистого бетона автоклавного твердения понизилась на 27% (табл. 1). Прочность на вырыв химического анкера в кладке из блоков из ячеистого бетона автоклавного твердения снизилась на 14%. Прочность сцепления блоков из ячеистого бетона автоклавного твердения с кладочным раствором повысилась, что говорит о продолжающемся наборе прочности кладочного раствора при циклических воздействиях. Кроме того, основная площадь зон расположения кладочного раствора и клея не была затронута знакопеременными воздействиями, поскольку находилась в толще кладки из легковесных блоков, обладающих высоким термическим сопротивлением.

Таким образом, в качестве контролируемых параметров, определяемых разрушающими методами, целесообразно принять прочность сцепления (адгезии) блоков со слоем штукатурки, а также прочность на вырыв химических анкеров.

Заключение

Конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны, применяемые в наружных ограждающих конструкциях, существенно снижают тепловые потери здания в холодный период года. В работе решена задача установления критериев оценки стойкости наружных стен из легковесных блоков к попеременному замораживанию и оттаиванию в лабораторных условиях. Впервые проведены исследования морозостойкости кладок из ячеистого бетона автоклавного твердения при циклах одностороннего увлажнения—замораживания—прогрева, что

наиболее близко к реальным условиям эксплуатации наружных стен.

В результате проведенных исследований получены физико-механические и теплофизические характеристики теплоизоляционно-конструкционных бетонов. Установлены зависимости теплозащитных качеств от степени увлажнения материала, а также прочности от условий оттаивания образцов в воде и в воздушной среде.

Отработаны особенности проведения испытаний легковесных блоков, в том числе на фрагментах кладок в процессе циклических температурно-влажностных воздействий при одностороннем замораживании. Результатом является назначение нормируемых параметров стеновых кладок из легковесных блоков при оценке морозостойкости.

Результаты применимы при разработке и актуализации нормативных, технических и организационно-методических документов по проектированию стеновых кладок из легковесных блоков, в частности при разработке национального стандарта «Кладки стеновые из легковесных блоков. Методы определения морозостойкости».

Список литературы / References

1. Yarmakovskiy V.N., Pustovgar A.P. The scientific basis for the creation of a composite binders class characterized of the low heat conductivity and low sorption activity of cement stone. *Procedia Engineering*. 2015. No. 5, pp. 12–17. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.160
2. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона. М.: АСВ, 2006. 336 с.

2. Ferronskaya A.V. Dolgovechnost' konstrukcij iz betona i zhelezobetona [Durability of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow: ASV. 2006. 336 p.
3. Spitzner I. A review of the development of lightweight aggregates – history and actual survey. *International Symposium on structural lightweight aggregate concrete*. Sandefjord. Norway. June 1995, pp. 22–32.
4. Ярмаковский В.Н., Кадиев Д.З. Физико-химические основы стойкости бетонов к воздействию низких отрицательных температур (Ч. 2) // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 5 (91). С. 133–144. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-91-5-133-144>
4. Yarmakovskiy V.N., Kadiev D.Z. Physical basis of concrete durability at low subzero temperatures. Part 2. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 5, pp. 133–144. (In Russian). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-91-5-133-144>
5. Ву К.З., Баженова С.И., Танг В.Л., Фан Х.Х. Влияние входных факторов на свойства пенобетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 2 (94). С. 86–95. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-86-95
5. Vu K.D., Bazhenova S.I., Tang V.L., Phan Kh.Kh. Influence of input factors on the foam concrete properties. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 2 (94), pp. 86–95. (In Russian). DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-86-95
6. Ярмаковский В.Н., Карпенко Н.И. Особенности технологии, структуры и механики высокопрочных конструкционных легких бетонов для морских гидротехнических сооружений в условиях Арктического континентального шельфа: *Труды Международной конференции «Полярная механика–2016»*. г. Владивосток. 2016. С. 24–32.
6. Yarmakovskiy V.N., Karpenko N.I. Features of technology, structure and mechanics of high-strength structural lightweight concrete for marine hydraulic structures in the Arctic continental shelf. *Proceedings of the International Conference «Polar Mechanics–2016»*. Vladivostok. 2016, pp. 24–32. (In Russian).
7. Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Zhukov A.D., Gradov V.A., Ivanova N.A., Kodzoev M.-B.Kh. Lightweight concrete based on crushed foam glass aggregate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1083. International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development» (CATPID 2020). 16–17 December 2020. Nalchik. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012038
8. Ushakov A.U., Zhukov A.D., Zinkevich E.S., Bessonov I.V. Modern materials and wooden housing construction technologies. *International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020)*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1079. 022072. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022072
9. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2020. Т. 12. № 6. С. 313–319. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
9. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demissi B.A. Application of statistical methods for solving problems of building materials science. *Nanotechnologii v stroitel'stve: scientific online journal*. 2020. Vol. 12. No. 6, pp. 313–319. (In Russian).
10. Ху Шугуан, Ван Фа Чжоу. Легкие бетоны: Монография / Пер. Го Ли. М.: АСВ, 2016. 299 с.
10. Hu Shuguang, Wang Fa Zhou. Legkie betony: monografiya [Lightweight concrete: a monograph]. Moscow: ASV. 2016. 299 p.
11. Bessonov I.V., Ushakov A.Yu., Zhukov A.D., Vidiborenko V.G. Assessment of light concrete frost resistance. *International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020)*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1079. 022078. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022078
12. Yarmakovskiy V.N. New types of the porous slag aggregates and lightweight concretes and their application. *International Symposium on structural lightweight aggregate concrete*. Sandefjord. Norway. 1995, pp. 363–373.
13. Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 93–102.
13. Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Academia Architectura i stroitel'stvo*. 2015. No. 1, pp. 93–102. (In Russian).
14. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. М.: НИИСФ РААСН, 2004. 333 с.
14. Alexandrovskiy S.V. Dolgovechnost' naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktssii [Durability of external enclosing structures]. Moscow: NIISF RAASN. 2004. 333 p.
15. Ву К.Д., Баженова С.И. Моделирование влияния входных факторов на свойства пенобетона // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 103 (3). 10311. DOI: 10.34910/MCE.103.11
16. Ву К.Д. Влияние алюминиевого порошка на свойства легкого пенобетона // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1425. Modelling and Methods of Structural Analysis. 13–15 November 2019. Moscow. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012199>
17. Танг В.Л., Ву К.Д., Нго Х.Н., Ву Д.Т., Булгаков В.И., Баженова С.И. Влияние алюминиевого порошка на свойства легкого пенобетона // *E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019*. 2019. 02005. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199702005

О.А. ЛАРСЕН, канд. техн. наук (larsen.oksana@mail.ru),
А.М. БАХРАХ, инженер (аспирант) (antonbahrah@mail.ru)

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

Изменение удельного электрического сопротивления токопроводящего бетона в процессе твердения

Проведен анализ методов получения токопроводящего бетона и влияния его состава на удельное электрическое сопротивление. Предложены составы композиционного вяжущего, получаемого совместным предварительным перемешиванием сухих компонентов до затворения, включающих портландцемент, технический углерод в количестве 15 и 30% от массы вяжущего, а также порошкообразный пластификатор. Проведен анализ полученных данных об изменении удельного электрического сопротивления при твердении в нормальных условиях. Получена зависимость прочности и изменения удельного электрического сопротивления от соотношения минерального вяжущего и токопроводящего компонента.

Ключевые слова: токопроводящий бетон, удельное электрическое сопротивление, гидратация, портландцемент.

Для цитирования: 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>

O.A. LARSEN, Candidate of Sciences (Engineering) (larsen.oksana@mail.ru),
A.M. BAHRAH, engineer (postgraduate student) (antonbahrah@mail.ru)
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, 129337, Moscow, Russian Federation)

Change in the Specific Electrical Resistance of Conductive Concrete During the Hardening Process

The analysis of methods for obtaining conductive concrete and the influence of its composition on the specific electrical resistance is carried out. The compositions of a composite binder obtained by joint preliminary mixing of dry components including Portland cement, carbon black in the amount of 15 and 30% of the binder weight, as well as a powdered plasticizer before mixing with water, are proposed. An analysis of the data obtained on the change in specific electrical resistance during hardening under normal conditions was carried out. The dependence of strength and change in specific electrical resistance on the ratio of the mineral binder and the conductive component has been obtained.

Keywords: conductive concrete, specific electrical resistance, hydration, Portland cement.

For citation: 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>

Электротехнические свойства бетонов могут изменяться в широком спектре отраслей: электроэнергетике, строительстве, оборонно-промышленном комплексе [1–4]. Токопроводящие композитные электропроводные материалы могут быть из минерального вяжущего или полимерного связующего в зависимости от состава, на основе которого они изготавливаются. Электропроводный бетон на основе цементного вяжущего получил название «бетэл», или «токопроводящий» бетон.

В строительстве наиболее актуально использование токопроводящих композитов на основе цементной матрицы. Формирование структуры цементного камня является чрезвычайно сложным процессом, определяющим возможность расширения либо усадки [5].

Токопроводящие бетоны получают за счет введения токопроводящих компонентов, таких как технический углерод [6], кокс [7], углеродная фибра [8], металлическая стружка [9], углеродные нанотрубки [10, 11].

На основе токопроводящих компонентов, содержащих металлическую фибру, был разработан особо высокопрочный бетон. Авторы [12] проводили исследова-

ния зависимости электрического сопротивления особо высокопрочного фибробетона. Максимальное содержание фибры составило 3% общего объема. В образцы-призмы при твердении погружались медные пластины, с помощью мультиметра проводились измерения удельного электрического сопротивления. Образцы после частичного разрушения показали снижение значения удельного электрического сопротивления, при этом измерения проводились по нескольким направлениям. Было установлено, что увеличение проводимости связано с повышением количества контактов между фиброй.

В работе [13] предложено совместное использование металлической фибры и стальной стружки при следующем расходе токопроводящих компонентов для получения бетэла: стальная фибра 1–3 об. %; стальная стружка 5–40 об. %. При этом были получены следующие характеристики бетэла: удельное электрическое сопротивление 1–40 Ом·см, предел прочности при сжатии не менее 30 МПа, плотность 1450–1850 кг/м³.

Также для получения токопроводящего бетона применяется углеродная фибра. В работе [14] получен бетэл с удельным электрическим сопротивлени-



Рис. 1. Измерение сопротивления образца
Fig. 1. Sample resistance measurement

Таблица 1
Table 1

**Химический состав
клинкера ЦЕМ 0 52,5Н
The chemical composition
of clinker CEM 0 52.5N**

| Содержание компонентов, % | | | | | | |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-----------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | R ₂ O | SO ₃ |
| 21,65 | 5,05 | 3,65 | 66,37 | 1,32 | 0,63 | 3,09 |

Таблица 2
Table 2

**Минералогический состав
клинкера ЦЕМ 0 52,5Н
Mineralogical composition
of clinker CEM 0 52.5N**

| Содержание компонентов, % | | | |
|---------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
| 64 | 14 | 7 | 11 |

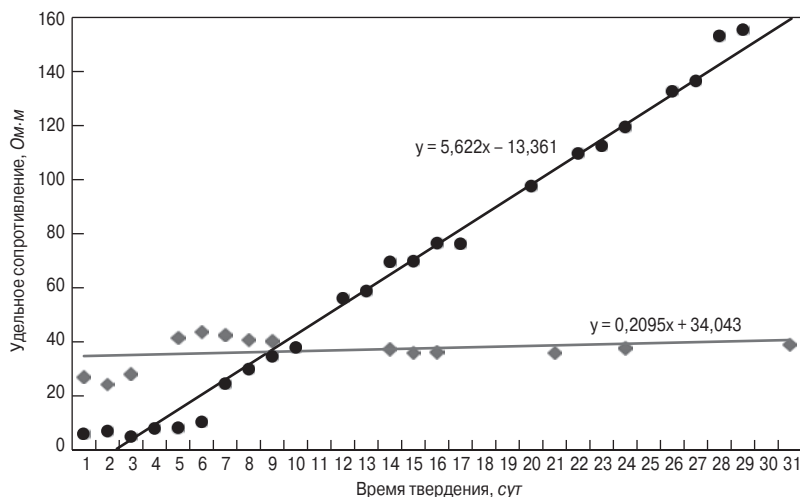


Рис. 2. Изменение удельного электрического сопротивления образцов при твердении в нормальных условиях: ● – 15% технического углерода; ◆ – 30% технического углерода
Fig. 2. Change in the electrical resistivity of samples during hardening under normal conditions: ● – 15% carbon black; ◆ – 30% carbon black

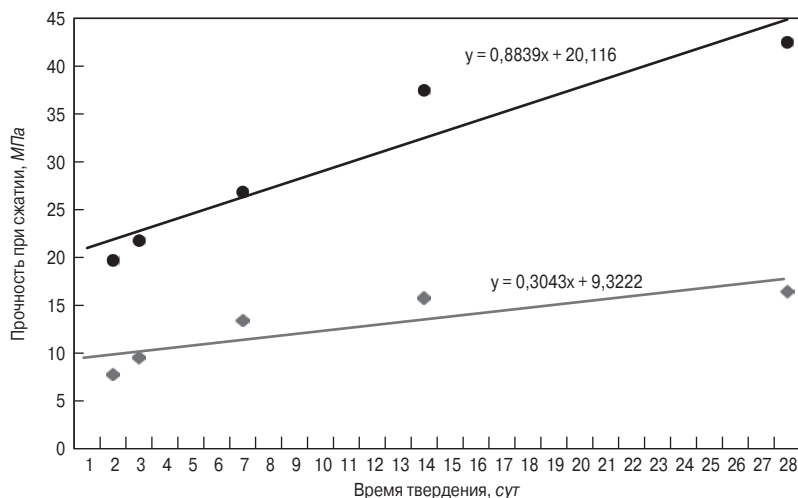


Рис. 3. Кинетика набора прочности композиционного вяжущего: ● – 15% технического углерода; ◆ – 30% технического углерода
Fig. 3. Kinetics of strength development of the composite binder: ● – 15% carbon black; ◆ – 30% carbon black

Таблица 3
Table 3

**Состав образцов
Sample composition**

| № образца | Содержание ЦЕМ 0 52,5Н, % | Содержание технического углерода, мас. % | Содержание пластификатора Полипласт СП-3, % от массы вяжущего | В/В | Расплав формы-конуса, мм |
|-----------|---------------------------|--|---|-----|--------------------------|
| 1 | 85 | 15 | 1,5 | 0,5 | 200 |
| 2 | 70 | 30 | 3,2 | 0,5 | 200 |

ем 45–55 Ом·см путем добавления углеродной фибры в количестве 2% от массы цемента. Получен токопроводящий бетон со стабильными свойствами, однако, принимая во внимание стоимость углеродной фибры, массовое применение такой технологии затруднительно, что связано с низкой экономической эффективностью.

Геометрические параметры фибры оказывают решающее значение на получение токопроводящего бетона. Согласно данным [15, 16] оптимальными геометрическими параметрами фибры являются

длина 3–15 мм и диаметр в несколько микрон. Достаточно эффективно использование углеродных нанотрубок, однако развитие технологии останавливает их высокая стоимость.

В отечественной практике наибольшее развитие получили исследования в области токопроводящих бетонов с добавлением технического углерода. Большое количество работ [17–21] посвящено изучению влияния таких свойств технического углерода, как структурность и удельная поверхность на проводимость композитов. Вместе с тем влияние процесса

гидратации портландцемента на формирование токопроводящих цепочек из токопроводящего компонента изучено недостаточно.

Материалы и методы

В работе применены следующие материалы:

- бездобавочный портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н производства ООО «ХайдельбергЦемент Рус» Новогуровского цементного завода в соответствии с ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» со следующими характеристиками: $S_{уд}=3970 \text{ см}^2/\text{г}$; сроками схватывания: началом – 205 мин, конец – 245 мин; нормальной густотой цементного теста 29%; прочностью при сжатии в возрасте 2 сут – 29,5 МПа; прочностью при сжатии в возрасте 28 сут – 58,4 МПа. В табл. 1 и 2 представлен химический и минералогический состав клинкера;
- технический углерод марки К-354 согласно ГОСТ 7885–86 «Углерод технический для производства резины. Технические условия»;
- суперпластифицирующая добавка Полипласт СП-3 в виде водорастворимого порошка темно-коричневого цвета на основе сополимера полиметиленафталинсульфоната и лигносульфоната натрия;
- вода согласно ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Для обеспечения эффекта самоуплотнения исследование проводилось на равноподвижных смесях композиционного вяжущего. При этом диаметр расплыва соответствовал 200 мм, полученным при использовании формы-конуса в соответствии с ГОСТ 310.4–81. Цементное тесто изготавливалось с одинаковым количеством воды затворения, равным 0,5 от массы композиционного вяжущего и различным количеством суперпластифицирующей добавки, расход которой находился в пределах 1,5–3,2. Применение большего количества суперпластификатора объясняется высокой удельной поверхностью технического углерода.

Измерение значений абсолютного электрического сопротивления производилось цифровым мультиметром RGK DM-30 776448, внесенным в госреестр измерительного оборудования. Измерения производились на образцах в форме параллелепипеда с размерами 200×100×5 мм путем подключения щупов мультиметра к проводам, соединенным с металлическими контактными пластинами с размерами 30×80 мм, расположенными внутри образца на расстоянии 100 мм друг от друга, симметрично расположенными относительно поперечного и продольного сечений образца (рис. 1).

Значения удельного электрического сопротивления рассчитывались на основании полученных измерений абсолютного электрического сопротивления и геометрических параметров образца в соответствии с законом Ома для участка цепи.

Результаты исследования

Были изготовлены образцы композиционного вяжущего, полученного на равноподвижном тесте для измерения электрического сопротивления в соответствии с методикой, описанной выше, а также образцы-балочки размером 160×40×40 мм. Соотношения компонентов и свойства теста приведены в табл. 3. Основным отличием составов друг от друга является количество токопроводящего компонента, которое составило 15 и 30% для составов № 1 и 2 соответственно. При этом значительная водопотребность технического углерода потребовала увеличения количества пластификатора более чем в два раза в составе № 2 для получения равноподвижной смеси.

После схватывания и твердения в течении 1 сут в воздушно-сухих условиях образцы были распалублены и помещены в камеру нормального твердения. Результаты измерений удельного электрического сопротивления приведены на рис. 2. Установлено, что состав с содержанием 15% технического углерода на 7-е сут нормального твердения имел удельное электрическое сопротивление 24,6 Ом·м, на 28-е сут – 153,1 Ом·м. Для состава с содержанием 30% технического углерода эти значения составили 42,6 и 38 Ом·м соответственно.

Значение коэффициента при аргументе аппроксимирующей прямой зависимости удельного электрического сопротивления от срока твердения составило 5,62 для состава с содержанием 15% технического углерода и 0,21 для состава с 30% технического углерода. При этом сопротивление образца с 30% технического углерода в возрасте от 1 до 10 сут твердения превышало значение сопротивления для образца с содержанием 15% технического углерода. Полученные результаты могут быть объяснены наличием большего количества ионов растворимых минералов портландцементного клинкера, а также более значительным изменением их содержания для состава с меньшим количеством технического углерода. Логично предположить, что изменение удельного электрического сопротивления может быть связано с процессом гидратации портландцемента (рис. 3).

Далее образцы подвергались прочностным испытаниям. Было установлено, что прочность состава с содержанием в композиционном вяжущем 15% технического углерода составила 26,8 МПа на 7-е сут и 42,5 МПа на 28-е сут. Прочность композиционного вяжущего с содержанием 30% технического углерода на 7-е сут составила 13,5 МПа, на 28-е сут – 16,5 МПа. Это объясняется повышением объемной концентрации технического углерода, ослабляющего структуру цементного камня.

Выводы

1. Получены составы композиционного вяжущего с повышенной электрической проводимостью на основе портландцемента, технического углерода в количестве 15 и 30%, а также порошкообразного

суперпластификатора. Введение технического углерода в сочетании с повышенным количеством пластификатора позволяет получить композиционный материал на основе портландцемента, обладающий повышенной электрической проводимостью.

2. Изучено влияние времени твердения композиционного вяжущего в нормальных условиях на величину удельного электрического сопротивления. Для состава, содержащего 15% технического углерода, удельное электрическое сопротивление было меньше в возрасте 1–10 сут твердения, чем для состава с содержанием 30% технического углерода, что может быть объяснено большим количеством ионов растворимых компонентов портландцемента ввиду большего количества вяжущего в составе. Вместе с тем в дальнейшем образец с 30% технического углерода не претерпел существенного изменения сопротивления, в то время как сопротивление образца с 15% технического углерода увеличилось более чем в три раза.

3. Анализ кинетики набора прочности образцов показал существенный прирост прочности для образцов состава с 15% технического углерода, что вполне закономерно, за счет содержания большего количества вяжущего, меньшего количества пластификатора, вводимого для получения равноподвижных составов. Прирост прочности с 7-х по 14-е сут у образцов состава с 30% технического углерода был незначителен.

4. На основании полученных данных можно сделать вывод о влиянии процесса гидратации на изменение удельного электрического сопротивления токопроводящего камня из композиционного вяжущего, что может быть объяснено уменьшением содержания свободной воды и ионов водорастворимых соединений портландцемента в ней, обеспечивающих ионную проводимость на ранних этапах твердения композиционного вяжущего. Вместе с тем дополнительного изучения требует вопрос влияния изменений структуры цементного камня в процессе твердения на цепочки токопроводящего компонента.

Список литературы / References

1. Федюк Р.С., Кузьмин Д.Е., Батаршин В.О. и др. Электропроводящие бетоны для специальных сооружений // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения*. 2017. № 1. С. 51–57.
1. Fedyuk R.S., Kuzmin D.E., Batarshin V.O., et al. Electrically conductive concrete for special structures. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya*. 2017. No. 1, pp. 51–57. (In Russian).
2. Терехин И.А., Кремлев И.А., Кондратьев Ю.В. и др. Модельное представление сухого бетона железобетонного фундамента контактной сети как электрического проводника // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2015. № 3. С. 88–92.
2. Terekhin I.A., Kremlev I.A., Kondratiev Yu.V. Model representation of dry concrete of the reinforced concrete foundation of the contact network as an electrical conductor. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015. No. 3, pp. 88–92. (In Russian).
3. 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.
3. Titova T.S., Satsuk T.P., Terekhin I.A., Tarabin I.V. Evaluation of electrical safety conditions when using contact network supports as natural ground electrodes. *Elektrotekhnika*. 2021. No. 2, pp. 7–11. (In Russian).
4. Агунов А.В., Терехин И.А., Баранов И.А. Анализ применения электропроводящих бетонов в электроэнергетике // *Транспортные системы и технологии*. 2021. Т. 7. № 2. С. 5–15.
4. Agunov A.V., Terekhin I.A., Baranov I.A. Analysis of the use of electrically conductive concrete in the power industry. *Transportnyye sistemy i tekhnologii*. 2021. Vol. 7. No. 2, pp. 5–15. (In Russian).
5. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня. 2-е изд. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. 288 с.
5. Samchenko S.V. Formirovaniye i genezis struktury tsementnogo kamnya: 2-ye izdaniye [Formation and genesis of the structure of cement stone: 2nd edition]. 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. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2019. No. 8 (92), pp. 163–172. (In Russian). DOI: 10.18720/MCE.92.1
7. Рекомендации по приготовлению электропроводящего раствора: утв. Госстрой СССР ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский институт бетона и железобетона (НИИЖБ) 10.01.1983. М., 1983. 9 с.
7. Recommendations for the preparation of an electrically conductive solution: approved. Gosstroy of the USSR Order of the Red Banner of Labor Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete. 10/01/1983. Moscow. 1983. 9 p. (In Russian).
8. Gao D., Sturm M., Mo Y.L. Electrical resistance of carbon-nanofiber concrete. *Smart Materials and*

- Structures*. 2011. No. 20 (4), pp. 101–112. DOI: 10.1088/0964-1726/20/4/049501
9. Wu J., Liu J., Yang F. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction building materials*. 2015. No. 75, pp. 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004>
 10. Грешкина Е.В., Табагуа Г.Р., Тамов М.М. Электрическая проводимость и пьезорезистивные свойства цементного камня с добавлением углеродных нанотрубок. *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 6 (57). С. 46.
 10. Greshkina E.V., Tabagua G.R., Tamov M.M. Electrical conductivity and piezoresistive properties of cement stone with the addition of carbon nanotubes. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2019. No. 6 (57), p. 46. (In Russian).
 11. Ягубов В.С., Щегольков А.В. Саморегулируемый электронагреватель на основе эластомера, модифицированный многослойными углеродными нанотрубками // *Вестник ВГУИТ*. 2018. Т. 80. № 3. С. 341–345.
 11. Yagubov V.S., Shchegolkov A.V. Self-regulating electric heater based on elastomer modified with multilayer carbon nanotubes. *Vestnik of VGUIT*. 2018. Vol. 80. No. 3, pp. 341–345. (In Russian).
 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. Heydar Dehghanpour, Kemalettin Yilmaz, Faraz Afshari, Metin Ipek. Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach. *Construction and building materials*. 2020. Vol. 260. 119948. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119948>
 14. 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>
 15. 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>
 16. Yu Xun, Kun Zhang. Carbon nanotube based self-sensing concrete for pavement structural health monitoring (Contract Number: DTFH 61-10C-00011) Final Report.” 2012.
 17. 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>
 18. Voet A., Russell Cook F. 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>
 19. Boonstra B.B., Dannenberg E.M. Performance of Carbon Blacks - Influence of Surface Roughness and Porosity. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1955. Vol. 47. No. 2, pp. 339–344. <https://doi.org/10.1021/ie50542a043>
 20. 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>
 21. Verhelst W.F., Wolthuis K.G., Voet A., Ehrburger P., Donnet J.B. 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**ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ****Учебное и практическое пособие**

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

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



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

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

25 лет КНАУФ-суперлисту в России



Благодаря активной и открытой информационной политике немецкой компании КНАУФ наши читатели хорошо знакомы с ее предприятиями и выпускаемой продукцией. На протяжении многих лет мы поддерживаем деловые связи с заводами КНАУФ в разных регионах страны, их руководители и ведущие специалисты неоднократно выступали авторами статей в журнале «Строительные материалы»®. Одно из предприятий компании – ООО «КНАУФ ГИПС Дзержинск» – сотрудники редакции вновь посетили в октябре 2022 г. в связи с 25-летием окончания первого этапа модернизации и перехода на выпуск инновационной продукции – КНАУФ-суперлиста.

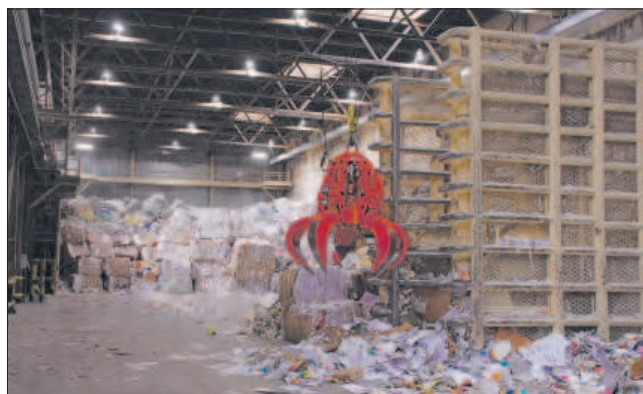


Следует отметить, что выпуск строительного гипса и гипсоволокнистых листов был начат в г. Дзержинске Нижегородской области еще в советское время, когда в 1986 г. вступил в строй завод «Авангард». Начавшиеся в 1990-х гг. социально-политические и экономические преобразования не позволили предприятию выйти на должный уровень качества продукции и успешно закрепиться на турбулентном, формирующемся строительном рынке. В 1996 г. предприятие было приобретено немецкой компанией КНАУФ. Уже в 1997 г., после первой модернизации, завод приступил к выпуску высококачественной брендовой продукции – **КНАУФ-суперлиста** – на обновленной конвейерной линии. С тех пор началась новая история предприятия с постоянным расширением ассортимента, обновлением оборудования, внедрением ценностей КНАУФ.

С 1999 г. завод постоянно входит в рейтинг ста лучших предприятий – производителей строительных материалов в России. В 2021 г. ООО «КНАУФ ГИПС Дзержинск» стало лауреатом общенационального конкурса на лучшее предприятие промышленности строительных материалов и строительной индустрии и получило диплом I степени «За достижение высокой эффективности и конкурентоспособности в строительстве и промышленности строительных материалов».

Гипсоволокнистые листы (КНАУФ-суперлист) – высококачественный, экологически чистый отделочный листовый материал, изготавливается методом полусухого прессования из смеси гипсового вяжущего и измельченных волокон макулатуры, выполняющих роль армирующего наполнителя. Его физико-механические свойства полностью соответствуют повышенным требованиям пожарной безопасности, тепло- и звукоизоляции зданий, прочностным характеристикам конструкций.

Вместе с техническим директором Вадимом Борисовичем Галкиным мы прошли по технологической линии, от гипсоварочной печи и участка подготовки макулатуры до линии производства элементов сборного основания пола КНАУФ-суперпол



и упаковки готовой продукции. Конечно, везде чистота, разметка для передвижения людей и технологического транспорта, интуитивно понятная инфографика.

На предприятии внедрена современная система менеджмента качества. Действует собственная лаборатория, оснащенная самым современным оборудованием и укомплектованная высококвалифицированными специалистами.

Тепло принял нас генеральный директор ООО «КНАУФ ГИПС Дзержинск» Алексей Борисович Сергунин. Он отметил, что в настоящее время на предприятии трудится более 200 человек. Несмотря на непростую экономическую ситуацию, в 2022 г. потребителям отгружено даже больше продукции, чем в 2021 г.

Большое внимание уделяется минимизации воздействия на окружающую среду собственного производственного комплекса, заключен договор на производственный контроль по промышленным выбросам с ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии». Кроме того, «КНАУФ ГИПС Дзержинск» является переработчиком отходов – макулатуры. Отходы производства ГВЛ (обрезки, шлифпыль) возвращаются в производство и используются повторно.

Гипсоволокнистые листы

Широкому внедрению ГВЛ в практику отечественного строительства, как и в целом технологии сухого строительства, российские строители во многом обязаны компании КНАУФ, которая существенную долю инвестиций направляет в обучение на всех уровнях, создание нормативной и методической базы применения гипсоволокнистых листов.

В ассортименте предприятий – производителей ГВЛ – КНАУФ-суперлистов – листы с повышенной твердостью и плотностью. В зависимости от требуемых характеристик и условий эксплуатации помещений листы используются для устройства ограждающих несущих конструкций: перегородок, подвесных потолков, внутренней облицовки стен, оснований пола и отделки путей эвакуации. ГВЛ практически незаменимы при устройстве мансардных помещений, зон эвакуации и оснований пола (так называемой сухой стяжки), особенно из сборных элементов КНАУФ-суперпол.

Новый ГОСТ на гипсоволокнистые листы

С 1 февраля 2023 г. в силу вступит разработанный при участии специалистов компании КНАУФ новый ГОСТ Р 51829–2022 «Листы гипсоволокнистые и изделия на их основе. Технические условия» взамен ГОСТ Р 51829–2001, в составлении которого КНАУФ также принимал участие.

ГОСТ Р 51829–2022 разрабатывался в соответствии с европейским стандартом на гипсоволокнистые листы DIN EN 15283-2:2009. Отличительной особенностью ГОСТ Р является то, что в него вошли не только гипсоволокнистые листы, но и изделия из них – элементы пола. В документе приведен новый показатель – объемное водопоглощение, появилась новая маркировка листов, введено две категории листов с поверхностным водопоглощением вместо одной существующей.

Также текст дополнен требованиями к листам, которые будут обозначены в маркировке: повышенная прочность (П1 и П2), твердость поверхности (Т), плотность (М) и негорючесть (НГ). Новый ГОСТ приведен в соответствие с законодательством в области пожарной безопасности в части сертификации гипсоволокнистых листов.

Системы и конструкции из КНАУФ-суперлистов для обеспечения пожарной безопасности

Для обеспечения нераспространения пламени, т. е. его локализации в месте возгорания, применяют методы пассивной огнезащиты. Листовые материалы КНАУФ помогают максимально сохранить функциональное назначение и несущую способность конструкций зданий и сооружений и увеличивают промежуток времени от начала пожара до достижения критического состояния конструкций и их обрушения.

Противопожарные перегородки, потолки, облицовки, а также коробка для инженерных систем КНАУФ ограничивают распространение огня в условиях пожара, тем самым помогая спасти жизни людей и имущество.

Огнестойкость конструкции – это предел сопротивления системы воздействию огня. Он характеризуется временем стойкости конструкции, а точнее, временем, за которое огонь не сможет ее разрушить (привести к обрушению) или прорваться в соседнее помещение, если температура нагрева в смежной комнате не станет критичной. Конструкции должны быть смонтированы так, чтобы было время для тушения пожара или безопасной эвакуации. В зонах риска, а также в местах, где проходят пути эвакуации, предпочтительно использовать негорючие материалы. В ассортиментной линейке КНАУФ в России к негорючим материалам относятся гипсовый лист КНАУФ-Файерборд, поверхность которого оклеена стеклохолстом, гипсоволокнистый лист КНАУФ-суперлист НГ и листовая материал из легкого бетона АКВАПАНЕЛЬ®. Предел огнестойкости стандартных конструкций, которые предлагает КНАУФ на российском рынке, может достигать 240 мин.

Конструктивная огнезащита применяется для повышения предела огнестойкости стальных колонн, балок и ферм в жилых, общественных и производственных зданиях. В качестве конструктивной огнезащиты применяют каркасную и бескаркасную облицовки КНАУФ, огнезащитная эффективность которых достигает 180 мин.

Огнезащитные кабельные короба снижают задымление и выделение токсичных веществ из нагревающейся оплетки кабелей и ограничивают распространение огня по кабельным линиям и электротрассам, проходящим через помещения с высокой категорией взрывопожарной опасности. Короба также препятствуют выходу пламени в помещения в тех случаях, когда оно распространяется внутри кабельных линий.

Кабельные короба КНАУФ представляют собой однослойную или многослойную конструкцию из плит КНАУФ-Файерборд в зависимости от требуемого предела огнестойкости. Кабельные короба монтируются на каркасе или бескаркасным способом. Они имеют нормативный предел огнестойкости и могут сохранять работоспособность кабельной линии в условиях пожара до 180 мин.

Противопожарные перегородки КНАУФ представляют собой комплексные системы на основе листовых материалов, которые применяются для разделе-



Знаковые объекты

МФК «Океанис» в Нижнем Новгороде – общественный центр с более чем 110 магазинами, ресторанами и кафе, подземной и наземной парковкой на 1000 мест. Но главная функциональная составляющая комплекса – круглогодичный аквапарк. Его интерьер насыщен изгибами линий, смещением перекрытий галереи, искаженной перспективой.

При строительстве МФК «Океанис» были использованы комплектные системы КНАУФ: перегородки С362, С365 на металлическом каркасе с двухслойной обшивкой из гипсоволокнистых листов толщиной 12,5 мм; различные каркасно-обшивные системы с облицовками из КНАУФ-листов и цементных плит АКВАПАНЕЛЬ®.



ния помещений на пожарные отсеки или секции с целью предотвращения распространения пламени в условиях пожара.

Предел огнестойкости, в зависимости от применяемых систем, варьируется от EI 45 до EI 240, а индекс звукоизоляции от 43 до 72 дБ.

Огнестойкие подвесные потолки – действенное решение для ограждения несущих конструкций перекрытия и инженерных коммуникаций от открытого пламени. Огнезащитные потолки КНАУФ соответствуют пределам огнестойкости RE 45 и RE 150. В огнезащитных потолках применяются листовые материалы КНАУФ, такие как КНАУФ-лист «Сапфир» и КНАУФ-Файерборд.

Дополнительную защиту, в том числе и в частном доме, обеспечит применение «сухой стяжки» – сборного основания пола из элементов на основе гипсоволокнистых КНАУФ-суперлистов (КНАУФ-суперпол).

ВІМ КНАУФ

Впервые о ВІМ в качестве отдельного направления деятельности в международной группе КНАУФ задумались в 2012 г., а уже в 2014 г. появились первые наработки ВІМ в России для наиболее распространенных систем сухого строительства; в 2015 г. стартовала кампания по их внедрению в процесс проектирования. КНАУФ параллельно вел работу по созданию ВІМ-продуктов на основе как глобальных, так и национальных программных комплексов. В настоящее время библиотека КНАУФ насчитывает более 50 семейств и более 1000 узлов различных конструкций.



Каталоги систем КНАУФ адаптированы для работы в программах Revit, Renga и CSoft и доступны для свободной загрузки.

В 2019 г. российское подразделение КНАУФ подписало соглашение о сотрудничестве с компанией Renga Software. Сегодня ВІМ-библиотека КНАУФ насчитывает шесть каталогов для системы Renga, специалисты компании продолжают разрабатывать новые.

Каталоги комплектных систем КНАУФ для ВІМ-системы Renga разработаны с целью автоматизации процесса проектирования и размещены в свободном доступе на сайте компании в разделе «Документы».

Социальная ответственность

Много лет «КНАУФ ГИПС Дзержинск» является генеральным спонсором дзержинского детского танцевального ансамбля «Сюрприз». Предприятие оказывает благотворительную помощь в проведении детско-юношеского турнира по спортивным танцам «Зимнее танго», организатором которого является дзержинский спортивно-танцевальный центр «Алира». Предприятие помогает проводить турнир на высоком профессиональном уровне, что было оценено представителями Союза танцевального спорта России и турниру был присвоен статус международного.

Успешная экономическая деятельность ООО «КНАУФ ГИПС Дзержинск» позволяет оказывать помощь нуждающимся в ней людям и организациям Нижегородской области. Средства направляются организациям здравоохранения, учреждениям культуры, спортивным, детским и образовательным учреждениям, а также для поддержки ветеранов.

Немецкая компания КНАУФ пришла в Россию без малого 30 лет назад. Она принесла не только инвестиции и передовые технологии. Важнейшим вкладом компании в развитие строительного комплекса России стало внедрение новой философии ведения бизнеса, отношения к профессии и развитию личности, привнесение корпоративных ценностей, сформированных на основе морально-этических ценностей семьи Кнауф. Именно это целесообразно перенимать и внедрять в России.

Е.И. Юмашева
 Фото автора и Д. Ромашкова

УДК 666.972.55

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-19-25>

О.В. АЛЕКСАНДРОВА¹, канд. техн. наук (AleksandrovaOV@mgsu.ru),
 Б.И. БУЛГАКОВ¹, канд. техн. наук (BulgakovBI@mgsu.ru),
 С.В. ФЕДОСОВ¹, д-р техн. наук (FedosovSV@mgsu.ru);
 НГУЕН ДЫК ВИНЬ КУАНГ², канд. техн. наук (ndvquang@hueic.edu.vn);
 О.Б. ЛЯПИДЕВСКАЯ¹, канд. техн. наук (LyapidevskayaOB@mgsu.ru)

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

² Индустриальный колледж Хюэ (530000, Социалистическая Республика Вьетнам, г. Хюэ, Нгуен Хюэ Стрит, 70)

Применение белого кварцевого песка для получения бетонов высокой прочности

Речной кварцевый песок в Социалистической Республике Вьетнам становится дефицитным сырьевым материалом для строительной индустрии из-за больших объемов его использования при ограниченных ресурсах и высокой потребности в нем других отраслей промышленности. С учетом ежегодно возрастающей потребности в кварцевом песке, обусловленной высокими темпами развития строительной отрасли во Вьетнаме, велика опасность скорого истощения ресурсов речного кварцевого песка. Кроме того, чрезмерная добыча речного песка пагубно сказывается на экологии речных акваторий, а также на условиях проживания людей на их берегах. Поэтому актуальным является поиск альтернативных источников кварцевого песка. Представляется перспективным исследовать возможность замены речного песка как необходимого сырьевого компонента для получения строительных растворов и бетонов различного назначения, в том числе и высокопрочных, природным белым кварцевым песком, добываемым из карьеров, залежи которого имеются на всей территории Вьетнама и потенциальные запасы которого оцениваются в несколько миллиардов кубометров. Были использованы сульфатостойкий портландцемент производства вьетнамского завода «Luks Cement», местный гранитный щебень в виде смеси фракций 5–10 и 10–20 мм, природные речной и белый кварцевые пески, а также водоредуцирующий поликарбоксилатный суперпластификатор и тонкодисперсные минеральные добавки для частичной замены сульфатостойкого портландцемента в составе многокомпонентного вяжущего в виде ультра- и нанодисперсного кремнезема, золы-уноса тепловой электростанции «Фа Лай» и кварцевого порошка, полученного в результате тонкого помола белого песка. Для проектирования составов бетонных смесей был использован метод стандарта Вьетнама TCVN 10306:2014. Прочностные показатели разработанных бетонов определяли с помощью универсальной испытательной установки «Matest» модели C089-17N (Италия): при сжатии определяли – на образцах-кубах размером 100×100×100 мм в возрасте 3, 7 и 28 сут нормального твердения, на растяжение при изгибе – на образцах-призмах размером 100×100×400 мм, на растяжение при раскалывании – на образцах-цилиндрах размером 100×200 мм в возрасте 28 сут. Водопоглощение бетонов определяли на образцах-кубах размером 100×100×100 мм после 28 сут твердения в нормальных условиях. Плотность структуры бетонов оценивали путем определения ее проницаемости для ионов хлора с использованием бетонных образцов-дисков диаметром 100±2 мм и толщиной 50±3 мм. Установлено, что увеличение содержания доли белого песка в составе мелкого заполнителя приводит к снижению водопоглощения бетона и проницаемости его структуры для хлорид-ионов. Так, при 100%-й замене речного песка белым песком значения водопоглощения и общей величины электрических зарядов, прошедших через бетонные образцы за 6 ч проведения испытаний, составили 0,37 мас. % и 72,4 Кл соответственно, в то время как у образцов бетона, содержащего 100% речного песка, эти показатели составляют соответственно 0,44 мас. % и 284,2 Кл. При этом наибольшие значения прочности при сжатии, а также на растяжение при изгибе и раскалывании, равные соответственно 107,5; 12,2 и 8,07 МПа, были получены при испытании образцов бетона, содержащего 100 мас. % белого кварцевого песка и 1,5 мас. % нанодисперсного кремнезема в составе многокомпонентного вяжущего. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность замены дефицитного во Вьетнаме речного песка белым кварцевым песком, позволяющей получать бетоны, обладающие плотной структурой и высокими прочностными показателями.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, природный кварцевый песок, тонкодисперсные минеральные добавки, прочностные показатели, водопоглощение, плотность и проницаемость структуры бетона.

Для цитирования: Александрова О.В., Булгаков Б.И., Федосов С.В., Нгуен Дык Винь Куанг, Ляпидевская О.Б. Применение белого кварцевого песка для получения бетонов высокой прочности // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 19–25.
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-19-25>

O.V. ALEKSANDROVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (AleksandrovaOV@mgsu.ru),

B.I. BULGAKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (BulgakovBI@mgsu.ru),

S.V. FEDOSOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (FedosovSV@mgsu.ru),

NGUYEN DUC VINH QUANG², Candidate of Sciences (Engineering) (ndvquang@hueic.edu.vn),

O.B. LYAPIDEVSKAYA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (LyapidevskayaOB@mgsu.ru)

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

² Hue Industrial College (70, Nguyen Hue Str., Hue City, Vietnam)

Use of White Quartz Sand for High-Strength Concrete

River quartz sand in the Socialist Republic of Vietnam is becoming a scarce raw material for the construction industry due to the large volumes of its use with limited resources and the high demand for it in other industries. Taking into account the annually increasing demand for quartz sand, due to the high rate of development of the construction industry in Vietnam, there is a great danger of an early depletion of river quartz sand resources. In addition, excessive extraction of river sand negatively affects the ecology of river waters, as well as the living conditions of people on their shores. Therefore, the search for alternative sources of quartz sand is relevant. It seems promising to explore the possibility of replacing river sand as a necessary raw material component for the production of mortars and concretes for various purposes, including high-strength ones, with natural white quartz sand extracted from quarries, deposits of which are available throughout Vietnam and whose potential reserves are estimated at several billion cubic meters. Sulphate-resistant Portland cement produced by the Vietnamese plant "Luks Cement", local crushed granite in the form of a mixture of fractions of 5–10 and 10–20 mm, natural river and white quartz sands, as well as a water-reducing polycarboxylate superplasticizer and fine mineral additives were used to partially replace sulfate-resistant Portland cement in the composition of a multicomponent binder in the form of ultra- and nanodispersed silica, fly ash from the thermal power plant "Fa Lai" and quartz powder obtained as a result of fine grinding of white sand. Vietnamese standard TCVN 10306:2014 was used to design concrete mixtures. The strength indicators of the developed concretes were determined using the universal testing machine "Matest" model C089-17N (Italy): compressive strength was determined on cube samples 100×100×100 mm in size at the age of 3, 7 and 28 days of normal hardening, flexural strength – on prism samples 100×100×400 mm in size, tensile splitting strength – on cylinder samples 100×200 mm in size at the age of 28 days. Water absorption of concretes was determined on cube samples 100×100×100 mm in size after 28 days of hardening under normal conditions. The density of the concrete structure was assessed by determining its permeability to chlorine ions using concrete disk samples with a diameter of 100±2 mm and a thickness of 50±3 mm. It has found that an increase in the proportion of white sand in the composition of fine aggregate leads to a decrease in the water absorption of concrete and the permeability of its structure for chloride ions. Therefore, with a 100% replacement of river sand with white sand, the values of water absorption and the total value of electric charges that passed through concrete samples during 6 hours of testing amounted to 0.37% by weight and 72.4 Class, respectively, while for concrete samples containing 100% river sand, these figures are respectively 0.44% by weight and 284.2 Class. At the same time, the highest values of compressive strength, as well as flexural and tensile splitting strength equal to 107.5, 12.2 and 8.07 MPa, respectively, were obtained by testing concrete samples containing 100% by weight of white quartz sand and 1.5% by weight of nanodispersed silica as part of a multicomponent binder. Thus, the possibility of replacing the scarce river sand in Vietnam with white quartz sand has been experimentally confirmed, which makes it possible to obtain concretes with a dense structure and high strength indicators.

Keywords: high-strength concrete, natural quartz sand, fine mineral additives, strength indicators, water absorption, density and permeability of the concrete structure.

For citation: Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I., Fedosov S.V., Nguyen Duc Vinh Quang, Lyapidevskaya O.B. Use of white quartz sand for high-strength concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 19–25. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-19-25>

По данным Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), на долю песка приходится около 85% ежегодной мировой добычи природных ресурсов, что эквивалентно более чем 40 млрд т. За два последних десятилетия строительный бум в странах Азии и Африки повысил спрос на песок в три раза, и, по существующим прогнозам, к 2060 г. годовая добыча песка и гравия в мировом масштабе увеличится до 82 млрд т. [1]. Песок является одним из основных видов сырья для строительной индустрии и незаменимым материалом в таких областях, как бурение нефтяных скважин, производство электронных чипов, изготовление стекла, косметики и многие другие отрасли производства. В последние годы потребность в песке растет с опережающими темпами, особенно в развивающихся странах, таких как Вьетнам [2].

Во Вьетнаме природный речной кварцевый песок, также известный как желтый песок, является дефицитным сырьевым материалом, который играет ключевую роль для изготовления бетона. В настоящее время в строительной промышленности Вьетнама в качестве мелкого заполнителя для производства бетонов используется только природный песок, добываемый из долин рек и русел ручьев.

Однако речной кварцевый песок является не только ценным строительным ресурсом, но и играет важную роль в тектонике и стабилизации берегов и русел рек, а также в создании среды обитания для водных видов флоры и фауны. Чрезмерная добыча речного песка неминуемо приведет к эрозии берегов рек, что окажет негативное влияние как на водные экосистемы, так и на жизнедеятельность людей. В результате ограниченные ресурсы речного песка во Вьетнаме могут быть исчерпаны в ближайшем будущем.

Интенсивная добыча песка привела к тому, что в некоторых местах Красной реки, а также других рек, протянувшихся с севера на юг Вьетнама, снизился уровень воды и уменьшился ее объем. Так, в Ханое чрезмерная добыча песка привела к тому, что дно Красной реки оказалось намного ниже, чем дно небольших речек, образующих ее дельту. В результате этого вода из Красной реки перестала поступать в эти небольшие речки, что, в частности, привело к гибели реки Нхуэ-Джанг, которая кормила почти два миллиона жителей на ее берегах.

Согласно отчету Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама, в настоящее время общий ресурс песка в стране составляет чуть более 2 млрд м³, но только в 2020 г. спрос на песок для строительства достиг 182–197 млн м³, а к 2030 г. эта потребность увеличится до 326–477 млн м³. Поэтому без правильного планирования и поиска других материалов для замены природного речного песка Вьетнам рискует исчерпать его запасы в ближайшие десять лет, после чего будет вынужден прибегнуть к его импорту [3]. Из вышесказанного следует, что природный речной песок постепенно становится во Вьетнаме дефицитным ресурсом и в настоящее время весьма актуальным является поиск альтернативных источников песка. Одним из удачных решений этой проблемы может стать использование в строительстве природного белого кварцевого песка, добываемого из карьеров.

Во Вьетнаме природный белый кварцевый песок имеет обильные запасы, его залежи простираются вдоль всей береговой линии Вьетнама протяженностью 3260 км, и их площадь составляет около 600 тыс. га с общими запасами до нескольких миллиардов кубических метров. Поэтому проведение исследований о возможности использования природ-

ного белого кварцевого песка в качестве мелкого заполнителя для замены речного песка в бетонах и строительных растворах имеет важное значение для строительной отрасли Вьетнама [4].

Используемые материалы и методы исследований

В работе были использованы следующие материалы.

Минеральное вяжущее – сульфатостойкий портландцемент PCSRд40 производства завода «Luks Cement» (Вьетнам), соответствующий требованиям TCVN 6067:2004 и ГОСТ 22266–2013 «Цементы сульфатостойкие. Технические условия». Основные характеристики цемента приведены в табл. 1.

Мелкий заполнитель – речной кварцевый песок (ПР) реки Хуонг и белый кварцевый песок (БП) (Вьетнам), соответствующие TCVN 10796:2015 и ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Основные свойства использованных песков представлены в табл. 2.

Крупный заполнитель – гранитный щебень из карьера Га Лой (Вьетнам) в виде смеси двух фракций 5–10 мм и 10–20 мм в соотношении 40:60, соответствующий требованиям TCVN 7570:2006 и ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия». Основные характеристики щебня приведены в табл. 3.

Химическая водоредуцирующая добавка – поликарбоксилатный суперпластификатор (СП) «Sika®Viscocrete®-151» по TCVN 8826:2011/2 и ГОСТ Р 56592–2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» в виде водного раствора с плотностью 1075–1095 кг/м³ и значением pH, равным 4–6.

Минеральные добавки: ультрадисперсный микрокремнезем (МК) производства фирмы «Sikacrete® PP1 – Sika Limited» (Вьетнам), соответствующий требованиям TCVN 8827:2013 и ГОСТ Р 56592–2015; золы-уноса (ЗУ) тепловой электростанции (ТЭС) «Фа Лай» (Вьетнам) по TCVN 10302:2014 и ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»; кварцевый порошок в виде кварцевой муки (Км), полученный в результате тонкого помола белого песка; нанодисперсный кремнезем (нано-SiO₂) [5–7]. Свойства использованных минеральных добавок представлены в табл. 4.

Для проектирования составов бетонных смесей был использован метод, приведенный в стандарте Вьетнама TCVN 10306:2014. Первоначально указанным методом был определен состав бетонной смеси для получения высокопрочного бетона класса по прочности при сжатии B65, не содержащего тонкодисперсных минеральных добавок, который представлен в табл. 5. Далее с помощью этого метода были рассчитаны составы бетонных смесей, содержащих указанные добавки, составы которых приведены в табл. 6.

Прочностные показатели разработанных бетонов определяли по TCVN 10303:2014, TCVN 3119:1993 и ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения

Таблица 1
Table 1

Основные характеристики сульфатостойкого портландцемента PCSR40
Main characteristics of sulphate-resistant Portland cement

| Характеристики | Результаты испытаний |
|---|----------------------|
| Активность в возрасте 2 сут/28 сут, МПа | 25,7/46,5 |
| Тонкость помола: – остаток на сите № 009 после просеивания, мас. % – удельная поверхность, м ² /кг | 0,7 363,3 |
| Сроки схватывания, начало/конец, мин | 170/213 |
| Равномерность изменения объема, мм | 1,36 |
| Содержание щелочей (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), мас. % | 0,55 |
| Нерастворимый остаток, мас. % | 0,89 |
| Содержание трехкальциевого алюмината С ₃ А, мас. % | 3,4 |
| Сумма алюминатов и алюмоферритов кальция (С ₄ АF + 2С ₃ А), мас. % | 18,48 |
| Относительное расширение после 14 сут испытаний на сульфатостойкость, % | 0,016 |

Таблица 2
Table 2

Основные свойства речного и белого природных кварцевых песков
Main properties of river and white natural quartz sands

| Вид песка | Модуль крупности | Плотность, кг/м ³ | Насыпная плотность, кг/м ³ | Содержание глины, мас. % | Растворимость в HCl, мас. % |
|--------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Речной песок | 3 | 2670 | 1560 | 0,5 | 0,52 |
| Белый песок | 2,5 | 2240 | 1450 | 0,2 | 0,48 |

Таблица 3
Table 3

Основные характеристики гранитного щебня
Main characteristics of crushed granite

| Характеристики | Значения |
|---|----------|
| Плотность, кг/м ³ | 2680 |
| Насыпная плотность, кг/м ³ | 1390 |
| Пустотность, % | 46,9 |
| Средняя прочность при сжатии, МПа | 105,6 |
| Содержание пылевидных и глинистых частиц, % | 0,73 |

прочности по контрольным образцам» с помощью универсальной испытательной установки «Matest» модели C089-17N (Италия). Прочность бетонов при сжатии определяли на образцах-кубах размером 100×100×100 мм в возрасте 3, 7 и 28 сут нормального твердения, прочность на растяжение при изгибе – на образцах-призмах размером 100×100×400 мм и на растяжение при раскалывании – на образцах-цилиндрах размером 100×200 мм в возрасте 28 сут.

Водопоглощение бетонных образцов определяли в соответствии со стандартами TCVN 3113:1993 и ГОСТ 12730.3–2020 «Бетоны. Метод определения

**Таблица 4
Table 4**

**Свойства использованных тонкодисперсных минеральных добавок
Properties of used fine mineral additives**

| Показатель | Ед. изм. | Тонко-молотый кварцевый порошок | Ультра-дисперсный микро-кремнезем | Зола-уноса | Нано-дисперсный кремнезем |
|-------------------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------|---------------------------|
| Плотность | кг/м ³ | 2600 | 2150 | 2310 | 2330 |
| Насыпная плотность | кг/м ³ | 1450 | 500–700 | 990 | – |
| Удельная поверхность | м ² /кг | 250 | 16300 | 1200 | 139000 |
| Средний размер частиц | мкм | 5–95 | <0,1 | 3,05 | 0,01–0,05 |
| Потери при прокаливании | мас. % | 0,044 | 1,68 | 0,95 | – |

**Таблица 5
Table 5**

**Контрольный состав бетонной смеси
Control composition of the fresh concrete**

| Сырьевые материалы | Количество |
|--|------------|
| Цемент, кг/м ³ | 550 |
| Вода, кг/м ³ | 156 |
| Крупный заполнитель, кг/м ³ | 1088 |
| Мелкий заполнитель, кг/м ³ | 654 |
| Суперпластификатор, л/м ³ | 9,9 |
| Вовлеченный воздух, % | 2 |

**Таблица 6
Table 6**

**Составы бетонных смесей с тонкодисперсными минеральными добавками
Compositions of fresh concretes with fine mineral additives**

| Состав | Вязущие материалы, кг/м ³ | | | | | Заполнители, кг/м ³ | | | | | Вода | СП | (В+СП)/В _{вяж} |
|--------|--------------------------------------|------|-----|-----------------------|------|--------------------------------|--------------------|-----|-------|-------|-------|-----|-------------------------|
| | Цемент | МК | ЗУ | Нано-SiO ₂ | | Щебень | Мелкий заполнитель | | | | | | |
| | | | | кг | % | | кг | кг | % | кг | | | |
| 5aS0 | 357,5 | 27,5 | 165 | – | – | 1080 | 592,3 | – | – | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |
| 5aS1 | 352 | 27,5 | 165 | 1 | 5,5 | 1080 | 592,3 | – | – | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |
| B40 | 357,5 | 27,5 | 165 | – | – | 1080 | 355,4 | 40 | 236,9 | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |
| B60 | 357,5 | 27,5 | 165 | – | – | 1080 | 236,9 | 60 | 355,4 | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |
| B80 | 357,5 | 27,5 | 165 | – | – | 1080 | 118,5 | 80 | 473,8 | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |
| B100 | 357,5 | 27,5 | 165 | – | – | 1080 | – | 100 | 592,3 | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |
| BS1,0 | 352 | 27,5 | 165 | 1 | 5,5 | 1080 | – | 100 | 592,3 | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |
| BS1,5 | 349,25 | 27,5 | 165 | 1,5 | 8,25 | 1080 | – | 100 | 592,3 | 104,5 | 127,6 | 9,9 | 0,25 |

водопоглощения». Испытания проводились на образцах-кубах размером 100×100×100 мм после 28 сут твердения в нормальных условиях.

Образцы погружали в резервуар с пресной водой с температурой 22±2°С и выдерживали в течение 24 ч до их полного насыщения. После этого образцы извлекали из воды и помещали на 1 мин на проводочную сетку для удаления воды с их поверхности влажной тканью. Затем образцы помещали в вентилируемую печь при температуре 105±5°С не менее чем на 24 ч с учетом двух последовательных взвешиваний с интервалом в 2 ч для определения приращения потерь их массы с погрешностью не более 0,1% от последнего значения массы образца. За результат испытаний принимали среднее арифметическое значение водопоглощения, определенное на трех образцах из бетонной смеси одного состава.

Плотность структуры бетонов разработанных составов оценивали путем определения ее проницаемости для ионов хлора по стандарту TCVN 9337:2012 с использованием бетонных образцов-дисков диаметром 100±2 мм и толщиной 50±3 мм. После 28 сут твердения бетонные образцы были подвергнуты испытанию на сопротивляемость их структур проникновению хлорид-ионов путем создания напряжения постоянного тока 60 В между двумя контейнерами, заполненными соответственно 3%-м раствором NaCl

**Таблица 7
Table 7**

**Проницаемость структуры бетона для хлорид-ионов
Permeability of concrete structure for chloride ions**

| Среднее значение общего электрического заряда, прошедшего через образцы бетона за 6 ч испытаний, К | Уровень проницаемости структуры бетона для хлорид-ионов |
|--|---|
| >4000 | Высокий |
| 2000–4000 | Умеренный |
| 1000–2000 | Низкий |
| 100–1000 | Очень низкий |
| <100 | Непроницаемый |

и 0,3N раствором NaOH. Сила электрического тока измерялась каждые 30 мин в течение 6 ч. Общий электрический заряд в кулонах, прошедший через образец бетона за время проведения испытаний, рассчитанный по формуле (1), использовался в качестве индикатора сопротивления структуры бетона проникновению хлорид-ионов:

$$Q = \left(\frac{95}{x}\right)^2 \cdot 900 \cdot (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}), \quad (1)$$

где Q – общий электрический заряд, прошедший через бетонный образец в течение 6 ч, К; I₀, I₃₀, I₆₀ ... I₃₃₀, I₃₆₀ – сила тока, А, при продолжительности испытаний 0, 30, 60 ... 330, 360 мин; x – фактический диаметр испытуемого образца, мм.

Таблица 8
Table 8

Прочностные показатели разработанных бетонов
Strength indicators of developed concrete

| Состав | Прочность при сжатии, МПа, в возрасте твердения | | | | Прочность на растяжение при раскалывании, МПа | Прочность на растяжение при изгибе, МПа |
|--------|---|-------|--------|--------|---|---|
| | 3 сут | 7 сут | 14 сут | 28 сут | | |
| 5aS0 | 68,2 | 73,3 | 84,5 | 89,1 | 7,22 | 9,71 |
| B40 | 74,5 | 81,7 | 87,3 | 90 | 7,18 | 9,45 |
| B60 | 78,2 | 86,4 | 91,5 | 95,5 | 7,26 | 9,78 |
| B80 | 76 | 84,5 | 90,2 | 92 | 7,15 | 9,6 |
| B100 | 75,5 | 83,3 | 89,1 | 91,2 | 7,1 | 9,4 |
| BS1,0 | 83,8 | 91,5 | 99,5 | 106 | 7,84 | 11,75 |
| BS1,5 | 84,5 | 92,0 | 100,5 | 107,5 | 8,07 | 12,2 |

Таблица 9
Table 9

Влияние доли белого песка в составе мелкого заполнителя и нанодисперсного кремнезема на водопоглощение бетонов
Influence of the proportion of white sand in the composition of fine aggregate and nanodispersed silica on water absorption of concrete

| Состав | Образец № 1 | | | Образец № 2 | | | Образец № 3 | | | Водопоглощение, мас. % |
|--------|-------------|-----------|----------------|-------------|-----------|----------------|-------------|-----------|----------------|------------------------|
| | m_1 , г | m_2 , г | W_1 , мас. % | m_1 , г | m_2 , г | W_2 , мас. % | m_1 , г | m_2 , г | W_3 , мас. % | |
| 5aS0 | 2469 | 2481 | 0,49 | 2512 | 2522 | 0,39 | 2487 | 2497 | 0,44 | 0,44 |
| 5aS1 | 2465 | 2477 | 0,49 | 2490 | 2501 | 0,44 | 2485 | 2495 | 0,4 | 0,44 |
| B40 | 2514 | 2524 | 0,4 | 2505 | 2515 | 0,4 | 2499 | 2510 | 0,44 | 0,41 |
| B60 | 2504 | 2515 | 0,44 | 2494 | 2504 | 0,4 | 2492 | 2501 | 0,36 | 0,4 |
| B80 | 2491 | 2500 | 0,36 | 2499 | 2509 | 0,4 | 2492 | 2502 | 0,4 | 0,39 |
| B100 | 2502 | 2510 | 0,32 | 2490 | 2500 | 0,4 | 2498 | 2508 | 0,4 | 0,37 |
| BS1,0 | 2513 | 2519 | 0,24 | 2523 | 2527 | 0,16 | 2503 | 2508 | 0,2 | 0,2 |
| BS1,5 | 2496 | 2500 | 0,16 | 2492 | 2496 | 0,16 | 2506 | 2510 | 0,16 | 0,16 |

Таблица 10
Table 10

Средняя величина силы тока и общий электрический заряд, прошедший через бетонные образцы в течение шестичасовых испытаний
Average current strength and total electrical charge passed through concrete samples during the six-hour test

| Состав | τ, мин | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 360 | Q, Кл | Уровень проницаемости структуры бетона для хлорид-ионов |
|--------|--------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|---|
| | t, °C | 28 | 28 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | | |
| 5aS0 | I, mA | 0 | 12,9 | 13,4 | 13,9 | 14,2 | 14,2 | 13,9 | 13,9 | 14,2 | 13,9 | 13,1 | 13,3 | 13,1 | 284,2 | Очень низкий |
| 5aS1 | I, mA | 0 | 3,05 | 3,25 | 3,35 | 3,4 | 3,35 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,55 | 3,6 | 3,6 | 3,5 | 71,1 | Непроницаемый |
| B100 | I, mA | 0 | 3,1 | 3,3 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 72,4 | Непроницаемый |
| BS1,0 | I, mA | 0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,5 | 3,4 | 3,5 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 70,4 | Непроницаемый |
| BS1,5 | I, mA | 0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,4 | 3,2 | 3,3 | 3,3 | 3,3 | 3,1 | 66,2 | Непроницаемый |

Было обнаружено, что прошедший электрический заряд Q имеет тесную связь с сопротивлением структуры бетона проникновению ионов хлора, и поэтому стандартом Вьетнама TCVN 9337:2012 рекомендуется качественный критерий оценки плотности структуры бетонов – «уровень проницаемости структуры бетона для хлорид-ионов» в соответствии с диапазоном значений прошедшего электрического заряда, как показано в табл. 7.

Результаты исследований

Были проведены испытания с целью определения прочностных показателей, водопоглощения и про-

ницаемости структуры для хлорид-ионов восьми разработанных бетонов, полученных из бетонных смесей, составы которых приведены в табл. 6. Все указанные бетонные смеси содержали тонкодисперсные минеральные добавки для частичной замены сульфатостойкого портландцемента в составе многокомпонентного вяжущего [8–11].

Результаты испытаний при сжатии, растяжении при изгибе и раскалывании разработанных бетонов представлены в табл. 8.

Полученные экспериментальные результаты показали, что при использовании белого кварцевого песка в качестве мелкого заполнителя вместо речно-

го с увеличением его количества в бетонной смеси наблюдается существенный рост прочности бетонов при сжатии в раннем возрасте, а именно на третьи и на седьмые сутки, который постепенно замедляется в более позднем возрасте.

Результаты испытаний по определению водопоглощения разработанных бетонов представлены в табл. 9.

В результате проведенных испытаний было установлено, что водопоглощение бетонов разработанных составов снижается с увеличением доли белого песка в составе мелкого заполнителя. Это можно объяснить тем, что модуль крупности белого песка ($M_k=2,5$) меньше, чем у речного песка ($M_k=3$), что приводит к уменьшению пористости бетонов [12, 13].

Результаты испытаний разработанных бетонов на проницаемость для ионов хлора, позволяющие определить уровень проницаемости и оценить плотность их структур, представлены в табл. 10.

Из приведенных в табл. 10 экспериментальных результатов следует, что добавление нано-SiO₂ в количестве 1% от массы многокомпонентного вяжущего в бетонную смесь снижает проницаемость бетонов для хлорид-ионов (составы № БС1,0 и 5аС1). Установлено, что использование нанодисперсного кремнезема для частичной замены цемента в бетонных смесях, содержащих 100% белого кварцевого песка (составы № БС1,0 и БС1,5), приводит к значительному уменьшению проницаемости структур разработанных бетонов для хлорид-ионов по сравнению с контрольным составом № 5аС0 на речном песке, не содержащим нано-SiO₂: общий электрический заряд, прошедший через бетонные образцы указанных составов за шестичасовые испытания, составил соответственно 70,4 и 66,2 Кл против 284,2 Кл у образцов бетона контрольного состава. В то же время образцы бетона из смеси состава № Б100, содержащей в качестве мелкого заполнителя также только белый песок и не содержащей нанодисперсный кремнезем, показали величину прошедшего через них общего электрического заряда, равную 72,4 Кл, что почти в четыре раза меньше, чем у образцов контрольного состава и всего лишь на 2–9% выше, чем у бетонных образцов с нано-SiO₂. Причиной этому может являться больший процент содержания глинистых частиц в речном песке по сравнению с белым песком, что приводит к образованию воздушных пор в бетоне, способствующих проникновению в него хлорид-ионов [14, 15].

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что замена в качестве мелкого заполнителя в составе бетонных смесей речного песка белым кварцевым песком способствует уплотнению структуры бетонов и снижению уровня ее проницаемости для хлорид-ионов. При этом установлено, что введение в бетонные смеси нанодисперсного кремнезема в количествах 1–1,5% от массы многокомпонентного вяжущего лишь незначительно повышает плотность структур исследованных бетонов.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что использование в составе мелкого заполнителя белого кварцевого песка взамен речного песка позволяет получать бетоны, обладающие высокой прочностью, а также приводит к уплотнению структуры разработанных бетонов, что снижает их водопоглощение и будет способствовать повышению коррозионной стойкости и долговечности в жарких и влажных климатических условиях Вьетнама.

При этом бетон с наибольшими показателями прочности при сжатии 107,5 МПа, на растяжение при изгибе 12,2 МПа и на растяжение при раскалывании 8,07 МПа был получен при 100%-й замене речного песка белым кварцевым песком в составе мелкого заполнителя бетонной смеси и включении в состав многокомпонентного вяжущего 1,5 мас. % нанодисперсного кремнезема.

Кроме того, замена речного песка белым кварцевым будет способствовать снижению нагрузки на его истощаемые во Вьетнаме природные ресурсы и в целом окажет положительное влияние на улучшение экологической ситуации в стране.

Список литературы / References

1. Leal Filho, W. Hunt, J. Lingos, A. Platje, J. Vieira, et al. The unsustainable use of sand: reporting on a global problem. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (6). 3356. doi:10.3390/su13063356
2. Chính phủ Việt Nam. Nghị định số 23/2020/NĐ-CP của Chính phủ: Quy định về quản lý cát, sỏi lòng sông và bảo vệ lòng, bờ, bãi sông. 24/02/2020. 20 tr.
3. Pilarczyk K.W. Bank erosion Mekong Delta and Red River. Vietnam. 2016. 157 p.
4. Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam. *Nguồn cát tự nhiên sẽ cạn kiệt trong vòng 10 năm tới. Quản Lý Tài Nguyên Thiên Nhiên*, 2017, 168 tr.
5. Нгуен Дык Винь Куанг, Баженов Ю.М., Александрова О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокоэффективных бетонов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 1. С. 999–1006. DOI 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117
5. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Y.M., Aleksandrova O.V. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14 (1), pp. 102–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.102-117. (In Russian)
6. Nguyen Duc Vinh Quang, Aleksandrova O., Bulgakov B. Mechanical and durability properties of high-performance concrete in corrosive medium of Vietnam. *Proceedings of FORM 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 170, pp. 29–43. doi:10.1007/978-3-030-79983-0_4
7. Баженов Ю.М., Александрова О.В., Нгуен Дык Винь Куанг, Булгаков Б.И., Ларсен О.А., Гальцева Н.А., Голотенко Д.С. Высокопрочный бетон из материалов Вьетнама // *Строительные*

- материалы. 2020. № 3. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-32-38>
7. Bazhenov Yu. M., Aleksandrova O.V., Nguyen Duc Vinh Quang, Bulgakov B.I., Larsen O.A., Gal'tseva N.A., Golotenko D.S. High-performance concrete produced with locally available materials in Vietnam. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 3, pp. 32–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-32-3>
 8. Nguyen Duc Vinh Quang, Le D.V., Alexandrov O.V., Bulgakov B.I. Synthesis and characterization of silica nanoparticles from Vietnam. *Nanomaterials and Energy*. 2019. Vol. 8 (1), pp. 73–77. doi: 10.1680/jnaen.18.00012
 9. Nguyen Duc Vinh Quang, Aleksandrova O.V., Samchenko C.V. Combined effect of mineral admixtures and fine aggregate on the mechanical properties of ultrahigh performance concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. 032034. Doi:10.1088/1757-899X/869/3/032034
 10. Нгуен Дык Винь Куанг, Александрова О.В., Булгаков Б.И., Коровяков В.Ф., Каддо М.Б. Влияние золы-уноса в многокомпонентном вяжущем на прочность бетонов // *Техника и технология силикатов*. 2021. № 28 (3). С. 110–116.
 10. Nguyen Duc Vinh Quang, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Korovyakov V.F., Caddo M.B. Effect of fly ash in a multicomponent binder on the strength of concrete. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2021. Vol. 28. No. 3, pp. 110–116 (In Russian).
 11. Li C., Chen Q., Wang R., Wu M., Jiang Z. Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: Theoretical insights and practical data interpretations. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 112. 103652. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103652
 12. Dang An Tran, Maki Tsujimura, Le Phu Vo, Van Tam Nguyen, Dwight Kambuku & Thanh Duc Dang. Hydrogeochemical characteristics of a multi-layered coastal aquifer system in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. Vol. 42 (2), pp. 661–680. Doi: 10.1007/s10653-019-00400-9
 13. Trần Đ.Н., Nguyễn Q.Н. Đánh giá chất lượng nước vùng cửa sông và biển ven bờ để định hướng giải pháp công nghệ xử lý phù hợp cho mục đích cấp nước sinh hoạt. *khóa học công nghệ Xây dựng*. 2019. Vol. 10, pp. 89–98.
 14. Liu J., Huang Z., Zhu J., Liu W., Zhang W. Effect of fly ash as cement replacement on chloride diffusion, chloride binding capacity, and micro-properties of concrete in a water soaking environment. *Applied sciences*. 2020. Vol. 10. 6271. Doi:10.3390/app10186271
 15. M.M.A. Elahi, C.R. Shearer, R. R Naser, et al. Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 281. 122628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книга «Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий»

Авторы – Балакшин Ю.З., Терехов В.А.

Описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Даны характеристики сырьевым материалам – песку, щебню, вяжущим и химическим добавкам и рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.



Книга «Технология гипсовых отделочных материалов и изделий»

Автор – Федулов А.А.

В книге описано производство гипсовых отделочных материалов и изделий от добычи сырья до упаковки готовой продукции. Особое внимание автор уделяет подробному описанию технологических линий и отдельных единиц оборудования, установленных на передовых предприятиях гипсовой промышленности. В книге представлено большое количество иллюстраций всех технологических переделов, которые помогут глубже представить и понять технологические процессы производства того или иного изделия. Описание технологии каждого вида гипсовых изделий основывается на существующих производственных регламентах предприятий России, Германии и Дании, включая шахты, карьеры, которые автор посещал лично.

Книга предназначена студентам, изучающим производство строительных материалов и конструкций в качестве дополнительного материала по технологии современных гипсовых изделий, а также для инженеров-технологов заводов, производящих гипсовую продукцию в качестве справочного материала.



Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: mail@rifsm.ru, по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; или оформить заказ на сайте www.rifsm.ru

А.Д. ДЕНИСОВА, аспирант (denisova.frp@mail.ru),
А.С. ШЕХОВЦОВ, канд. техн. наук (a.shekhovtsov@gjp.su),
Е.Д. КУЖМАН, магистрант (kuzhman2@gmail.com)

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4)

Влияние ширины композиционного материала, применяемого при усилении железобетонных конструкций, на его работу при растяжении

Рассматривается композиционный материал системы внешнего армирования с предварительным напряжением – ФАП (фиброармированный полимер) ламинат. Приведены результаты испытаний ФАП ламината на растяжение различной ширины. Проанализировано влияние ширины ФАП ламината на его работу при растяжении, в том числе на характер разрушения. Приведена зависимость сопротивления ФАП растяжению от его ширины. Даны рекомендации по учету фактора ширины на этапе назначения расчетных значений сопротивления ФАП растяжению, а также на этапе проектирования анкера для восприятия предварительного напряжения и последующей передачи его на бетон усиливаемой конструкции.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, усиление, внешнее армирование, испытание, композиционный материал, система внешнего армирования, фиброармированный полимер, ширина композиционного материала.

Для цитирования: Денисова А.Д., Шеховцов А.С., Кужман Е.Д. Влияние ширины композиционного материала, применяемого при усилении железобетонных конструкций, на его работу при растяжении // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 26–31.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-26-31>

A.D. DENISOVA, Postgraduate Student (Engineer) (denisova.frp@mail.ru);

A.S. SHEKHOVTSOV, Candidate of Sciences (Engineering) (a.shekhovtsov@gjp.su);

E.D. KUZHMAN, Master's Student (kuzhman2@gmail.com)

St. Petersburg State University of Architectures and Civil Engineering (4, Vtoraya Krasnoarmeiskaya Street, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

Width Effect of Composite Material on its Tensile Behavior at Strengthening Reinforced Concrete Structures

The composite material of the external reinforcement system FRP laminate (FRP – fiber reinforced polymer) is considered. The results of tests of the FRP laminate for tensing of various widths are presented. The influence of the width of the FRP laminate on its tensile performance, including the nature of destruction, is analyzed. The dependence of the FAP resistance to stretching on its width is given. Recommendations are given on taking into account the width factor at the stage of assigning the calculated values of the FRP tensile resistance, as well as at the stage of designing the anchor to absorb the prestress and then transfer it to the concrete of the structure strengthened.

Keywords: reinforced concrete structures, strengthening, external reinforcement, test, composite material, external reinforcement system, fiber reinforced polymer, composite material width.

For citation: Denisova A.D., Shekhovtsov A.S., Kuzhman E.D. Width effect of composite material on its tensile behavior at strengthening reinforced concrete structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 26–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-26-31>

Системы внешнего армирования (СВА) из композиционных материалов с предварительным напряжением (ПН) зарекомендовали себя как эффективное решение по усилению железобетонных конструкций для решения задач снижения трещинообразования и уменьшения прогибов [1–13]. Надежность принятых решений обеспечивается в том числе достаточным пониманием работы материалов усиления, характеристики которых закладываются в расчетное обоснование.

В настоящее время на базе Испытательного центра СПбГАСУ (секция механических испытаний строительных конструкций) проводится комплексное исследование механических свойств материалов СВА с ПН – ФАП (фиброармированный полимер) ламината и адгезива.

По результатам ранее проведенных испытаний ФАП ламината на растяжение на образцах шириной

20 мм (согласно методике ГОСТ 25.601–80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение» при нормальной, повышенной и пониженной температуре) и 50 мм (наиболее часто встречаемая в практике усиления) получено, что сопротивление ФАП растяжению для образцов шириной 50 мм ниже на 12%, чем сопротивление ФАП ламинатов шириной 20 мм. Также отличался характер разрушения как в рамках одной серии испытаний (образцы шириной 50 мм), так и при переходе от одной серии к другой.

Предполагается, что на работу ФАП ламината при растяжении оказывает влияние его ширина. Однако не ясно, при какой ширине образца, отличной от рекомендуемой методикой ГОСТа, «эффект ширины» начинает оказывать существенное влияние, ко-

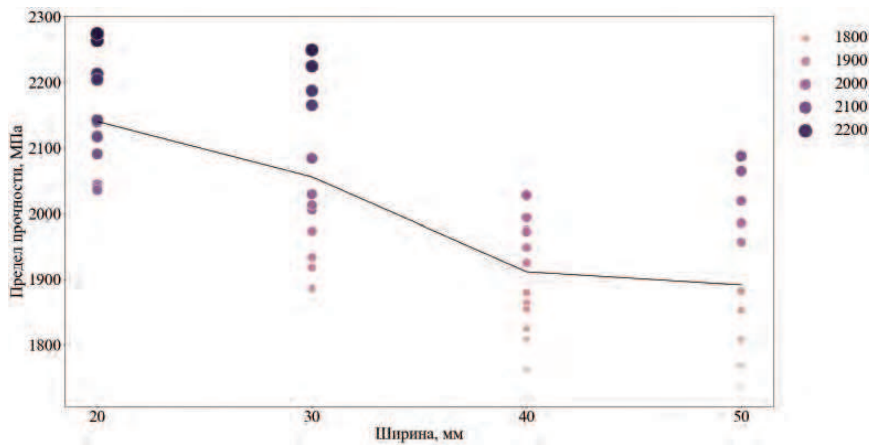


Рис. 1. Распределение значений сопротивления ФАП ламината при изменении ширины образца
 Fig. 1. Distribution of resistance values of FRP laminate when changing the width of the sample

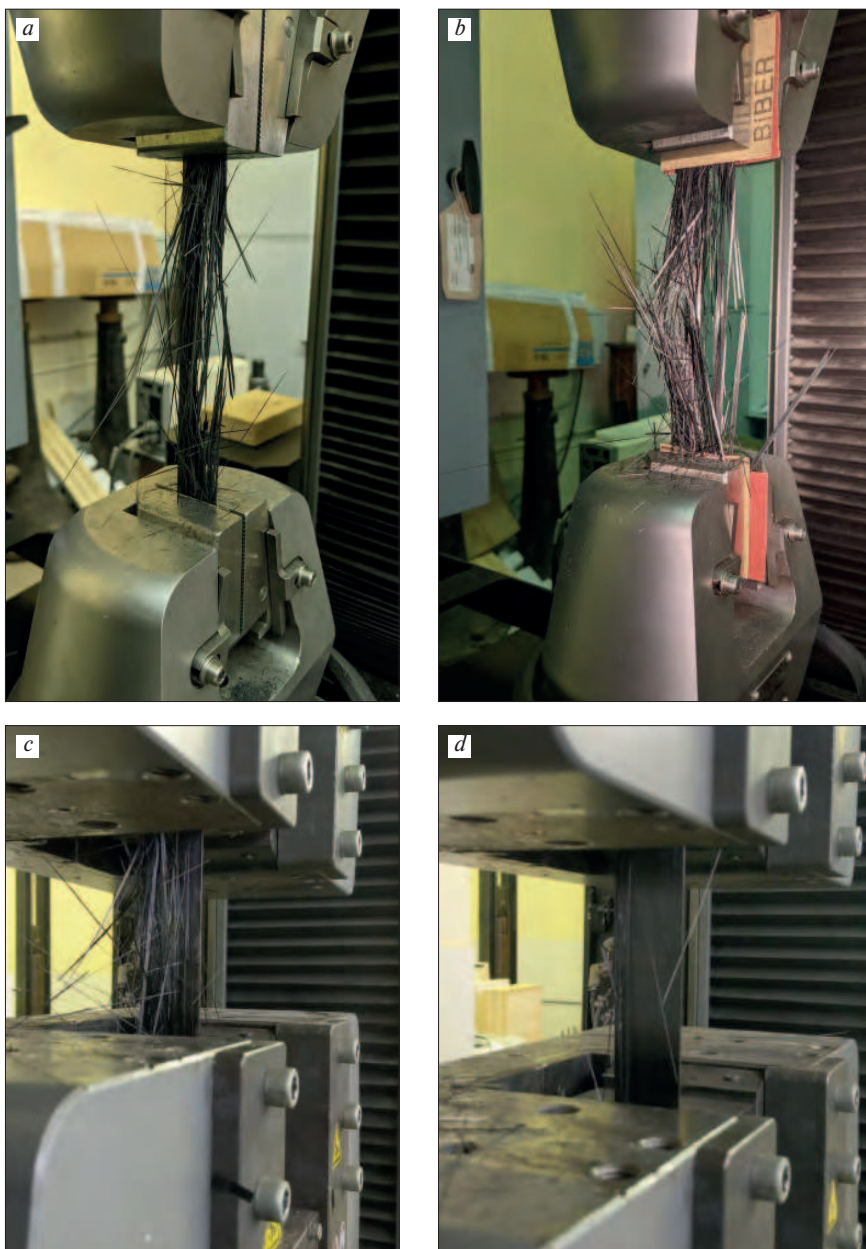


Рис. 3. Разрушение образцов серии: а – FRP-20; б – FRP-30; в – FRP-40; д – FRP-50
 Fig. 3. Destruction of samples of the series: a – FRP-20; b – FRP-30; c – FRP-40; d – FRP-50

торое необходимо учитывать при расчете усиления.

Для исследования данного эффекта проведена серия испытаний ФАП ламината, результаты которых представлены в настоящей статье.

Программа испытаний. Проведены испытания образцов ФАП ламината различной ширины на растяжение вдоль волокон при кратковременном действии нагрузки до разрушения. Цель испытаний – исследовать влияние ширины ФАП на его работу при растяжении.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) определить сопротивление ФАП растяжению; 2) получить зависимость сопротивления ФАП растяжению от его ширины; 3) оценить изменение характера разрушения ФАП при увеличении его ширины; 4) получить диаграмму нагружения – для оценки работы ФАП в процессе испытания, в том числе в зоне захватов, так как условия работы аналогичны условиям в механических анкерах при создании в ФАП ламинате предварительного напряжения.

Испытания проведены по ГОСТ 25.601–80: четыре серии испытаний ФАП ламината с шириной 20 мм (FRP-20), 30 мм (FRP-30), 40 мм (FRP-40) и 50 мм (FRP-50). В каждой серии по 12 образцов.

Опытные образцы плоские, в виде полосы прямоугольного сечения. Материал образцов – углеродный ФАП ламинат толщиной 1,4 мм, шириной 100 мм. Сопротивление ФАП растяжению, представленное производителем по результатам механических испытаний на образцах шириной 20 мм согласно ГОСТ 25.601–80, составило 2069 МПа.

В процессе испытания фиксировали разрушающую нагрузку, характер и место разрушения. Испытание образцов проводили на универсальных электромеханических машинах Instron. Нагружение образцов осуществлялось со скоростью перемещения захвата машины 5 мм/мин.

**Таблица 1
Table 1**

**Результаты испытаний образцов серии FRP-20
Test results for FRP-20 series specimens**

| Марка образца | b_f , мм | t_f , мм | $R_{f,ult}^{теор}$, МПа | $R_{f,ult}^{эксп}$, МПа | $(1 - \frac{R_{f,ult}^{эксп}}{R_{f,ult}^{теор}})$, % | $F_{ult}^{теор}$, кН | $F_{ult}^{эксп}$, кН | $(1 - \frac{F_{ult}^{эксп}}{F_{ult}^{теор}})$, % |
|-------------------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|
| FRP-20.1 | 20,01 | 1,4 | 2069 | 2212,44 | -6,93 | 61,98 | 63,31 | -2,15 |
| FRP-20.2 | 20,17 | | | 2118,19 | -2,38 | 59,81 | 61,1 | -2,15 |
| FRP-20.3 | 19,25 | | | 2263,3 | -9,39 | 61 | 62,17 | -1,92 |
| FRP-20.4 | 19,98 | | | 2203,92 | -6,52 | 61,65 | 62,97 | -2,14 |
| FRP-20.5 | 20,06 | | | 2139,5 | -3,41 | 60,09 | 61,37 | -2,14 |
| FRP-20.6 | 19,28 | | | 2142,02 | -3,53 | 57,82 | 59,09 | -2,2 |
| FRP-20.7 | 20,08 | | | 2274,06 | -9,91 | 63,93 | 65,3 | -2,15 |
| FRP-20.8 | 20,57 | | | 2043,53 | 1,23 | 58,85 | 58,84 | 0,02 |
| FRP-20.9 | 20,06 | | | 2039,21 | 1,44 | 57,27 | 57,27 | 0,00 |
| FRP-20.10 | 20,05 | | | 2090,38 | -1,03 | 58,68 | 58,68 | -0,01 |
| FRP-20.11 | 19,92 | | | 2035,37 | 1,63 | 56,76 | 56,76 | 0 |
| FRP-20.12 | 20,25 | | | 2116,45 | -2,29 | 60 | 60,01 | -0,01 |
| Среднее: | | | - | 2139,86 | - | - | - | - |
| Коэффициент вариации, % | | | - | 3,73 | - | - | - | - |

**Таблица 2
Table 2**

**Результаты испытаний образцов серии FRP-30
Test results for FRP-30 series specimens**

| Марка образца | b_f , мм | t_f , мм | $R_{f,ult}^{теор}$, МПа | $R_{f,ult}^{эксп}$, МПа | $(1 - \frac{R_{f,ult}^{эксп}}{R_{f,ult}^{теор}})$, % | $F_{ult}^{теор}$, кН | $F_{ult}^{эксп}$, кН | $(1 - \frac{F_{ult}^{эксп}}{F_{ult}^{теор}})$, % |
|-------------------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|
| FRP-30.1 | 29,99 | 1,4 | 2069 | 2224,18 | -7,5 | 93,38 | 95,385 | -2,14 |
| FRP-30.2 | 30,01 | | | 2186,75 | -5,69 | 91,86 | 93,84 | -2,15 |
| FRP-30.3 | 30,06 | | | 2164,65 | -4,62 | 91,09 | 93,05 | -2,16 |
| FRP-30.4 | 30,05 | | | 2083,76 | -0,71 | 87,67 | 89,542 | -2,13 |
| FRP-30.5 | 29,19 | | | 2249,07 | -8,70 | 91,9 | 93,911 | -2,19 |
| FRP-30.6 | 29,53 | | | 2028,91 | 1,94 | 83,87 | 83,88 | -0,01 |
| FRP-30.7 | 29,68 | | | 1917,85 | 7,31 | 79,69 | 79,69 | 0 |
| FRP-30.8 | 29,82 | | | 1886,01 | 8,84 | 78,74 | 78,74 | 0 |
| FRP-30.9 | 29,73 | | | 1973,09 | 4,64 | 82,13 | 82,12 | 0,02 |
| FRP-30.10 | 29,92 | | | 2005,22 | 3,08 | 83,99 | 83,99 | 0,01 |
| FRP-30.11 | 29,71 | | | 2012,54 | 2,73 | 83,72 | 83,71 | 0,01 |
| FRP-30.12 | 29,95 | | | 1933,24 | 6,56 | 81,07 | 81,06 | 0,01 |
| Среднее: | | | - | 2055,45 | - | - | - | - |
| Коэффициент вариации, % | | | - | 5,8 | - | - | - | - |

Результаты испытаний. В табл. 1–4 приведены полученные значения сопротивления ФАП растяжению и разрушающей нагрузке для образцов серии FRP-20, FRP-30, FRP-40, FRP-50 соответственно.

При увеличении ширины образца наблюдается снижение сопротивления растяжению ФАП (рис. 1). Разница для образцов шириной 20 и 50 мм составила 12%. Наиболее однородное распределение значений показали образцы серии FRP-20 (коэффициент вариации составил 3,73%).

Среднее сопротивление ФАП растяжению получено выше значения, представленного производителем, на 3,4% для серии испытаний FRP-20, и ниже на 0,7, 7,6 и 8,6% для серий FRP-30, FRP-40 и FRP-50 соответственно. Минимальные значения сопротивления ФАП растяжению для серий FRP-20–FRP-50 составили 2035,37; 1886,01; 1762,33; 1733,22 МПа соответственно.

Максимальные значения сопротивления ФАП растяжению для серий FRP-20–FRP-50 составили 2274,06; 2249,07; 2027,46; 2087,1 МПа соответственно.

Таблица 3
Table 3

Результаты испытаний образцов серии FRP-40
Test results for FRP-40 series specimens

| Марка образца | b_f , мм | t_f , мм | $R_{f,ult}^{теор}$, МПа | $R_{f,ult}^{эксп}$, МПа | $(1 - \frac{R_{f,ult}^{эксп}}{R_{f,ult}^{теор}})$, % | $F_{ult}^{теор}$, кН | $F_{ult}^{эксп}$, кН | $(1 - \frac{F_{ult}^{эксп}}{F_{ult}^{теор}})$, % |
|-------------------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|
| FRP-40.1 | 39 | 1,4 | 2069 | 2027,46 | 2,01 | 110,7 | 113,07 | -2,14 |
| FRP-40.2 | 39,15 | | | 1807,9 | 12,62 | 99,09 | 101,21 | -2,14 |
| FRP-40.3 | 38,98 | | | 1863,49 | 9,93 | 101,69 | 103,87 | -2,15 |
| FRP-40.4 | 39,92 | | | 1974,51 | 4,57 | 110,36 | 111,27 | -0,82 |
| FRP-40.5 | 39,95 | | | 1824,53 | 11,82 | 102,05 | 104,23 | -2,13 |
| FRP-40.6 | 39,68 | | | 1762,33 | 14,82 | 97,9 | 97,9 | 0 |
| FRP-40.7 | 39,6 | | | 1879,43 | 9,16 | 104,2 | 104,2 | 0 |
| FRP-40.8 | 40,11 | | | 1924,75 | 6,97 | 108,08 | 108,08 | 0 |
| FRP-40.9 | 40,08 | | | 1854,26 | 10,38 | 104,04 | 104,05 | -0,01 |
| FRP-40.10 | 39,99 | | | 1972,06 | 4,69 | 110,4 | 110,41 | -0,01 |
| FRP-40.11 | 39,62 | | | 1993,24 | 3,66 | 110,55 | 110,56 | -0,01 |
| FRP-40.12 | 40,17 | | | 1948,14 | 5,84 | 109,56 | 109,6 | -0,04 |
| Среднее: | | | - | 1911,29 | - | - | - | - |
| Коэффициент вариации, % | | | - | 4,04 | - | - | - | - |

Таблица 4
Table 4

Результаты испытаний образцов серии FRP-50
Test results for FRP-50 series specimens

| Марка образца | b_f , мм | t_f , мм | $R_{f,ult}^{теор}$, МПа | $R_{f,ult}^{эксп}$, МПа | $(1 - \frac{R_{f,ult}^{эксп}}{R_{f,ult}^{теор}})$, % | $F_{ult}^{теор}$, кН | $F_{ult}^{эксп}$, кН | $(1 - \frac{F_{ult}^{эксп}}{F_{ult}^{теор}})$, % |
|-------------------------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|
| FRP-50.1 | 48,65 | 1,4 | 2069 | 1881,66 | 9,05 | 143,94 | 128,16 | 10,96 |
| FRP-50.2 | 48,56 | | | 1806,31 | 12,7 | 143,67 | 122,88 | 14,47 |
| FRP-50.3 | 48,63 | | | 1852,77 | 10,45 | 143,88 | 126,14 | 12,33 |
| FRP-50.4 | 48,64 | | | 1767,8 | 14,56 | 143,91 | 120,38 | 16,35 |
| FRP-50.5 | 48,5 | | | 1985,42 | 4,04 | 143,5 | 134,81 | 6,06 |
| FRP-50.6 | 48,55 | | | 2087,1 | -0,87 | 143,64 | 141,86 | 1,24 |
| FRP-50.7 | 48,56 | | | 1808,07 | 12,61 | 143,67 | 122,92 | 14,44 |
| FRP-50.8 | 48,45 | | | 2064,28 | 0,23 | 143,35 | 140,02 | 2,32 |
| FRP-50.9 | 48,45 | | | 2018,81 | 2,43 | 143,35 | 136,71 | 4,63 |
| FRP-50.10 | 48,56 | | | 1733,79 | 16,2 | 143,67 | 117,87 | 17,96 |
| FRP-50.11 | 48,58 | | | 1733,22 | 16,23 | 143,73 | 117,88 | 17,99 |
| FRP-50.12 | 48,52 | | | 1956,19 | 5,45 | 143,55 | 132,88 | 7,43 |
| Среднее: | | | - | 1891,26 | - | - | - | - |
| Коэффициент вариации, % | | | - | 6,45 | - | - | - | - |

Примечания к табл. 1–4: b_f – средняя ширина образца, мм; t_f – средняя толщина образца, мм; $R_{f,ult}^{теор}$ – теоретический предел прочности при разрушении (согласно данным производителя), МПа; $R_{f,ult}^{эксп}$ – экспериментальный предел прочности при разрушении, МПа; $F_{ult}^{теор}$ – теоретическое значение нагрузки при разрушении, кН; $F_{ult}^{эксп}$ – экспериментальное значение нагрузки при разрушении, кН.

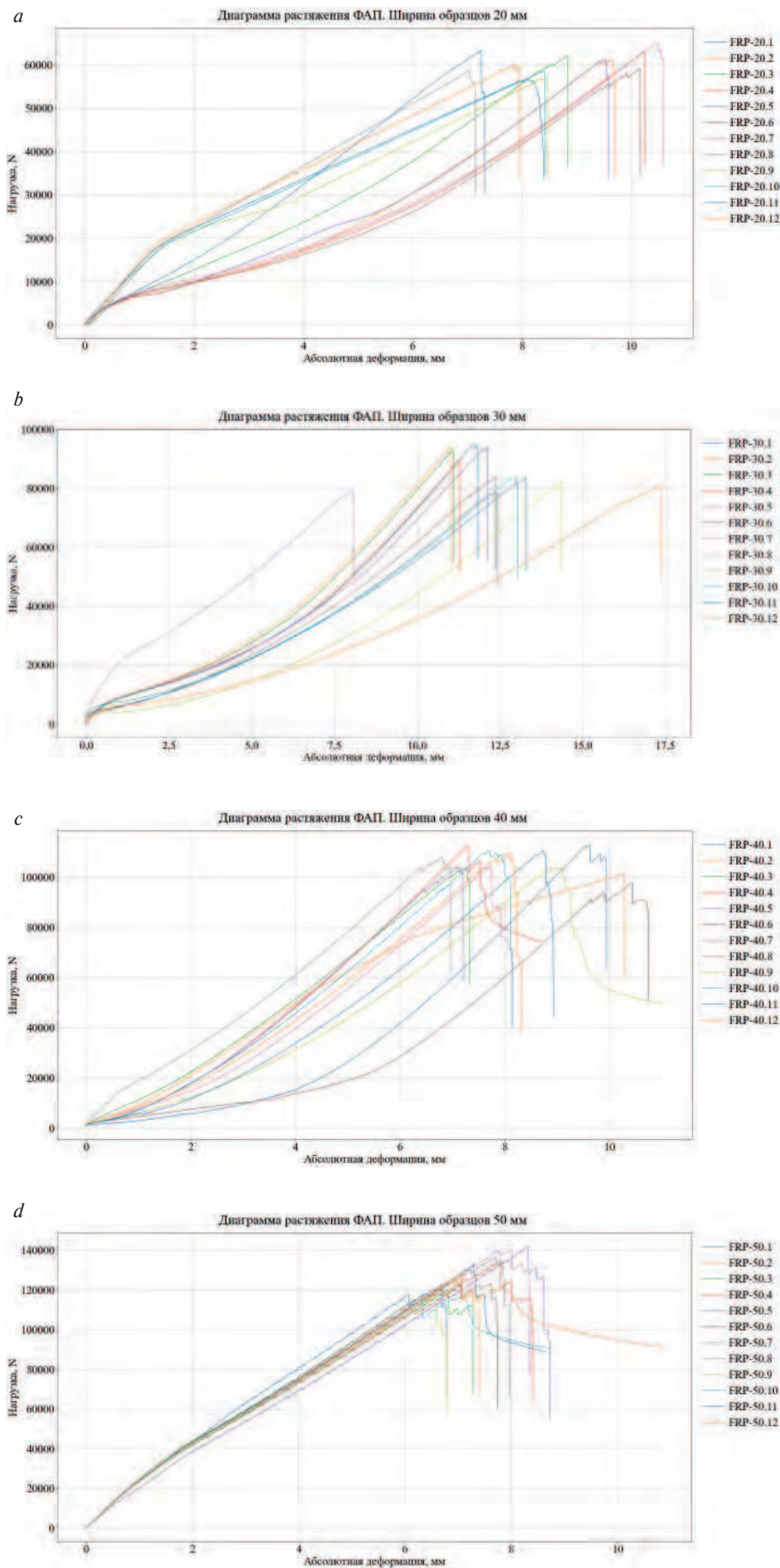


Рис. 3. Диаграмма нагружения образцов серии: а – FRP-20; б – FRP-30; в – FRP-40; д – FRP-50
 Fig. 3. Loading diagram for specimens of the series: a – FRP-20; b – FRP-30; c – FRP-40; d – FRP-50

Все образцы разрушились в рабочей зоне в результате разрыва волокон. При изменении ширины образца изменялась и средняя относительная площадь разрушения (среднее отношение площади разрушения к первоначальной в рамках одной серии испытаний). Образцы шириной 20 мм разрушались по всей ширине (рис. 2, а). Для образцов серии FRP-30 относительная площадь разрушения начинает изменяться от образца к образцу и остается в пределах 90–100%. Для образцов серий FRP-50 разрушение носит резко неоднородный характер. Относительная площадь разрушения изменяется от 10 до 50% от первоначальной (рис. 2, д). Предположительно такой эффект возникает из-за низкой эффект прочности на границе раздела «волокно–матрица», которая начинает влиять при достижении ширины образца в 30 мм, и/или из-за накопления микродефектов и повреждений.

Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что при увеличении ширины ФАП ламинат начинает работать как изделие, а не как материал.

На рис. 3 представлены диаграммы нагружения ФАП при растяжении. Для всех серий испытаний характерен нелинейный участок выпуклостью вверх на начальных ступенях нагружения, что обусловлено обжатием образца в губках (захватах). Однако при дальнейшем увеличении нагрузки наблюдается проскальзывание образцов в захватах (функция имеет выпуклость вниз). Данный эффект необходимо учесть при проектировании анкера, ограничив проскальзывание ФАП (исключить) для снижения потерь ПН при установке анкера. Далее графики «выпрямляются» и зависимость нагрузки от перемещения остается линейной вплоть до разрушения.

При испытании момент начала разрушения сопровождался характерным треском. На диаграммах нагружения этому соответствуют скачки нагрузки на ступенях, близких к разрушению. Разрушение начина-

лось с разрыва отдельных крайних волокон (первые скачки нагрузки на диаграммах), которое впоследствии распространялось на весь образец и носило хрупкий характер; происходило в рабочей зоне из-за разрыва волокон. При этом площадь разрушения относительно первоначальной от образца к образцу была различной.

Выводы

По результатам проведенных испытаний получено:

1. Ширина образца ФАП влияет на его сопротивление растяжению: чем больше ширина, тем ниже сопротивление ФАП растяжению.

2. Ширина начинает оказывать влияние уже при переходе от ширины образца 20 мм к ширине 30 мм – разница значений сопротивления растяжению составила 4,1%. При переходе к ширине 40 мм разница с шириной образца 30 мм составила 6,6%, при переходе от 40 к 50 мм – 1,3%.

3. При увеличении ширины образца увеличивается разброс значений сопротивления ФАП в рамках одной серии испытаний. Наиболее однородное распределение значений показали испытания образцов шириной 20 мм, наименее – 50 мм.

4. Для всех образцов характерно проскальзывание ФАП в захватах на начальных этапах загрузки.

При проектировании усиления ФАП ламинатами рекомендуется учитывать «эффект ширины» при назначении расчетных характеристик ФАП для фактически применяемой ширины, например посредством введения соответствующего коэффициента.

Для определения коэффициента, учитывающего «эффект ширины», необходимо провести испытания для каждого вида ФАП ламината (с заданным сопротивлением растяжению) для ширины в диапазоне от 20 до 100 мм (максимальное значение ширины ФАП, доступное на отечественном рынке).

Необходимо учесть возможность проскальзывания ФАП ламината в захватах (анкере) при проектировании анкера и расчете потерь предварительного напряжения.

Список литературы / References

- Liu Ch., X. Wang, Shi J., Lulu Liu, Wu Zh. Experimental study on the flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP laminates. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 233, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111801>
- Deng J., Xiaoda Li, Yi Wang. RC beams strengthened by prestressed CFRP plate subjected to sustained loading and continuous wetting condition: Flexural behavior. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 311, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125290>
- Slaitas J., Valivonis J. Full moment-deflection response and bond stiffness reduction of RC elements strengthened with prestressed FRP materials. *Composite structures*. 2020. Vol. 260, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113265>
- Ascione L., Berardi V.P., D'Aponte A. Long-term behavior of PC beams externally plated with prestressed FRP systems: A mechanical model. *Composites. Part B: Engineering*. 2011. Vol. 42. Iss. 5, pp. 1196–1201. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.02.023>
- Huang Zh., Deng W., Li. R. Multi-impact performance of prestressed CFRP-strengthened RC beams using H-typed end anchors. *Marine Structures*. 2022. Vol. 85. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103264>
- Yang J-Q, Feng P., Liu B. Strengthening RC beams with mid-span supporting prestressed CFRP plates: An experimental investigation. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 272, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115022>
- Wu B., Zhou Yu., Yin X. The anti-arch inhibition effect of multispans continuous girder bridge strengthened with prestressed CFRP plates. *Structures*. 2022. Vol. 35, pp. 845–855. <https://doi.org/10.1016/j.is-truc.2021.11.055>
- Hurukadli P., Bharti G. Behavior of fiber reinforced polymer laminates strengthening prestressed concrete beams. *Materials today: proceedings*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.036>
- Wei M-W., Xie J-H., Li J-L. Effect of the chloride environmental exposure on the flexural performance of strengthened RC beams with self-anchored prestressed CFRP plates. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 231, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111718>
- Moshiri N., Czaderski Ch., Mostofinejad D. Flexural strengthening of RC slabs with nonprestressed and prestressed CFRP strips using EBROG method. *Composites. Part B: Engineering*. 2020. Vol. 201, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108359>
- Atutis M., Valivonis J., Atutis Ed. Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers. Part II: Stress relaxation phenomenon. *Composite Structures*. 2018. Vol. 202, pp. 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.109>
- Mostakhdemin Hosseini M.R., Dias S.J.E., Barros J.A.O. Behavior of one-way RC slabs flexurally strengthened with prestressed NSM CFRP laminates – Assessment of influencing parameters. *Composite Structures*. 2020. Vol. 245, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112259>
- Денисова А.Д., Шеховцов А.С., Апполонова Ю.С. Влияние геометрических характеристик фиброармированного полимера (ФАП) на напряжения на границе раздела «ФАП–бетон» // *Жилищное строительство*. 2022. № 4. С. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-4-27-39>
- Denisova A.D., Shekhovtsov A.S., Appolonova Yu.S. Influence of geometric characteristics of fiber reinforced polymer (FRP) on stresses at the FRP–concrete interface. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2022. No. 4, pp. 27–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-4-27-39>

С.В. САМЧЕНКО¹, д-р техн. наук (samchenko@list.ru);
М.А. АБРАМОВ², канд. техн. наук (abramovma@ystu.ru);
А.Б. ОСМАНОВ^{1,2}, аспирант (bust-05@mail.ru)

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

² Ярославский государственный технический университет (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88)

Анализ изменения характеристик активированного цемента с использованием дезинтеграторной технологии

Целью исследования является изучение возможных изменений характеристик цемента при его активации с использованием дезинтеграторной установки. Активация цемента проводилась на дезинтеграторе ДСП-94 с энергией активации 17 кДж/кг. Исследования состояли из однократной, двукратной и трехкратной активации цемента в дезинтеграторной установке с последующим определением изменения физических характеристик частиц. Выявлено увеличение удельной поверхности цемента на каждую последующую активацию на 12–16%, а также отмечено увеличение числа контактов частиц примерно в два раза на каждый последующий проход цемента через дезинтеграторную установку. Установлено увеличение пустотности на 12,4% после первого прохода через установку. Выявлено изменение насыпной плотности частиц цемента после активации, а также определено изменение агломерации частиц цемента; уменьшение фракций частиц 40–63 мкм в сравнении с контрольным цементом: на 5,4; 8,7; 8,4% при энергии активации 17; 34 и 51 кДж/кг соответственно. Выполнено определение изменения размеров частиц цемента после однократной, двукратной и трехкратной активации с построением интегральных и дифференциальных кривых распределения частиц; построение распределения Розина–Раммлера частиц цемента с разной энергией активации. Определено изменение величины экзотермической реакции, а также изменение времени выделения экзотермической энергии при затворении активированного цемента водой.

Ключевые слова: активация цемента, экзотермия цемента, дезинтеграторная установка, удельная поверхность, распределение частиц.

Для цитирования: Самченко С.В., Абрамов М.А., Османов А.Б. Анализ изменения характеристик активированного цемента с использованием дезинтеграторной технологии // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 32–36.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36>

S.V. SAMCHENKO¹, Doctor of Sciences (Engineering) (samchenko@list.ru); M.A. ABRAMOV², Candidate of Sciences (Engineering) (abramovma@ystu.ru); A.B. OSMANOV^{1,2}, postgraduate (bust-05@mail.ru)

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

² Yaroslavl State Technical University (88, Moscow Avenue, Yaroslavl, 150023, Russian Federation)

Analysis of Changes in the Characteristics of Activated Cement Using Disintegrator Technology

The aim of the study is to research possible changes in the characteristics of cement during its activation using a disintegrator installation. Cement activation was carried out on a DSL-94 disintegrator with activation energy of 17 kJ/kg. The studies consisted of single, double and triple activation of cement in a disintegrator installation, followed by determination of changes in the physical characteristics of cement particles. An increase in the specific surface area of cement for each subsequent activation of cement by 12–16% was revealed, and an increase in the number of particle contacts by about 2 times for each subsequent passage of cement through the disintegrator unit was also noted. An increase in voidness by 12.4% was found after the first passage of cement through the disintegrator unit. A change in the bulk density of cement particles after activation was revealed, as well as a change in the agglomeration of cement particles was determined. A decrease in particle fractions of 40–63 microns was determined in comparison with the control cement: by 5.4%, 8.7%, 8.4% at activation energies of 17 kJ/kg, 34 kJ/kg and 51 kJ/kg, respectively. The determination of the change in the size of cement particles after single, double and triple activation with the construction of integral and differential curves of particle distribution, the construction of the Rosin-Rammler distribution of cement particles with different activation energies. The change in the magnitude of the exothermic reaction, as well as the change in the time of release of exothermic energy during the mixing of activated cement with water, was determined.

Keywords: cement activation, cement exothermy, disintegrator unit, specific surface area, particle distribution.

For citation: Samchenko S.V., Abramov M.A., Osmanov A.B. Analysis of changes in the characteristics of activated cement using disintegrator technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 32–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36>

Развитие технологии получения, а также изменения свойств цемента продолжается более ста лет. На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов улучшения характеристик цемента является предварительная подготовка, также называемая активацией. Активация цемента приводит к изменению крупности частиц цемента, созданию физических дефектов в подрешетках и решетках минералов, а также к модификации структуры частиц [1].

В настоящее время предварительная подготовка цемента насчитывает более десяти способов, некото-

рые из них: ультразвуковая обработка [2, 3], термическая активация [1], гидродинамическая активация или механохимическая активация (МХА) цементной суспензии [4, 5], измельчение вяжущего вещества в различных энергонапряженных аппаратах [6–8]. Наиболее простым и быстрым способом является его измельчение в специальных энергонапряженных помольных аппаратах [9].

Помольные аппараты классифицируются способом измельчения, который выбирается в зависимости от физико-механических свойств измельча-

емого материала [10]. В зависимости от применяемого помольного аппарата изменяются дисперсные характеристики продукта, геометрические формы образованных частиц и характер их поверхности, способ внешнего механического воздействия на частицы цемента [11]. Стоит отметить, что современные энергонапряженные аппараты должны обеспечивать непрерывность действия, ударное нагружение, а также постоянное удаление частиц обработанного материала из зоны измельчения, желательна с одновременной классификацией готового продукта и возвратом крупных частиц на дообработку [10]. Дезинтеграторная установка удовлетворяет данным требованиям, что определяет данный вид энергонапряженного аппарата как более перспективную установку для измельчения и активации цемента.

Дезинтеграторная установка позволяет активировать материалы широкого диапазона твердости, варьировать удельную энергию обработки измельчаемого материала путем смены роторов и изменением числа оборотов двигателя [9, 12, 13].

При активации частиц в дезинтеграторной установке образуются новые поверхности, которые приводят к повышенной реакционной способности в связи с физическими изменениями, вызванными измельчением [14].

Материалы и методы

Для анализа изменения характеристик активированного цемента использовался цемент М500 Д0 (СЕМ I 42, Н), Подольск-Цемент. Химический состав клинкера представлен в таблице.

Активация цемента проводилась на дезинтеграторной установке ДСЛ-94 с энергией МХА 17 кДж/кг путем загрузки в приемный бункер исследуемого цемента. Воздействие на цемент проводилась за один, два и три прохода через дезинтегратор.

После каждого прохода определялась удельная поверхность цемента на приборе Товарова Т-3, определялись изменения величины экзотермической реакции на приборе ОВЕН ТРМ 202, а также проводились электронные микроскопические исследования частиц на лазерном микроанализаторе MASTERSIZER. Гранулометрический состав активированного цемента определялся с использованием фотоседиментографа ФСХ-6.

Результаты исследования

В ходе выполнения работы при многократной активации цемента было отмечено увеличение удельной поверхности цемента, а также увеличение числа контактов частиц цемента (рис. 1), что обуславлива-

ется уменьшением их размеров. Установлено, что каждый последующий проход цемента через дезинтеграторную установку увеличивает число контактов частиц примерно в два раза.

При определении удельной поверхности отмечено ее увеличение на каждую последующую активацию цемента на 12–16% к предыдущему значению, однако активация при третьем проходе материала не приводит к увеличению удельной поверхности, что связано с нарушением кристаллической структуры частиц цемента и с увеличением их свободной энергии, приводящей к агрегированию.

При активации цемента установлено изменение его насыпной плотности и пустотности (рис. 2).

Увеличение пустотности активированного цемента связано с воздухововлечением, а следовательно, с увеличением расстояния между частицами активированного цемента. С данным свойством связано также уменьшение насыпной плотности. Увеличение пустотности после первого прохода цемента через дезинтеграторную установку составляет 12,4%.

Для определения размеров частиц цемента с разной энергией активации с применением лазерной микроскопии, а также математической обработки полученных результатов были построены интегральные (рис. 3) и дифференциальные (рис. 4) кривые распределения частиц цемента. Обнаружено уменьшение фракций частиц 40–63 мкм в сравнении с контрольным цементом: на 5,4% при энергии активации 17 кДж/кг; на 8,7% – при энергии активации 34 кДж/кг; на 8,4% при энергии активации 51 кДж/кг, а также увеличение количества частиц размером менее 10 мкм на 5,4; 7,1 и 7,2% соответственно.

В рамках работы с определением фракций частиц цемента после их многократной активации было построено распределение Розина–Раммлера частиц цемента с разной энергией активации (рис. 5), что позволяет судить об изменении характеристических размеров частиц цемента.

В ходе выполнения экспериментов было определено изменение энергии при экзотермической реакции в процессе гидратации активированного цемента (рис. 6). Можно отметить, что максимальное количество энергии, выделяемой при экзотермической реакции цемента с энергией активации, равной 34 кДж/кг, составило 21,6 кДж/кг, что в 1,4 раза больше энергии, выделяемой при экзотермической реакции контрольного образца; также пик тепловой энергии при экзотермической реакции цемента с энергией активации, равной 34 кДж/кг, начинается на 10 мин быстрее в сравнении с контрольным образцом.

Химический состав клинкера
The chemical composition of clinker

| Компоненты | ППП | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | R ₂ O |
|------------|------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|------------------|
| Клинкер | 0,92 | 62,75 | 20,1 | 4,56 | 8,72 | 1,99 | 0,57 | 1,58 |

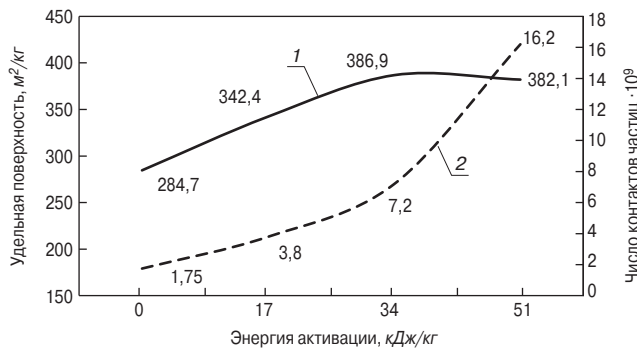


Рис. 1. Изменение удельной поверхности и числа контактов частиц цемента с различной энергией активации: 1 – удельная поверхность; 2 – число контактов

Fig. 1. Change in the specific surface area and the number of contacts of cement particles with different activation energies: 1 – specific surface; 2 – number of contacts

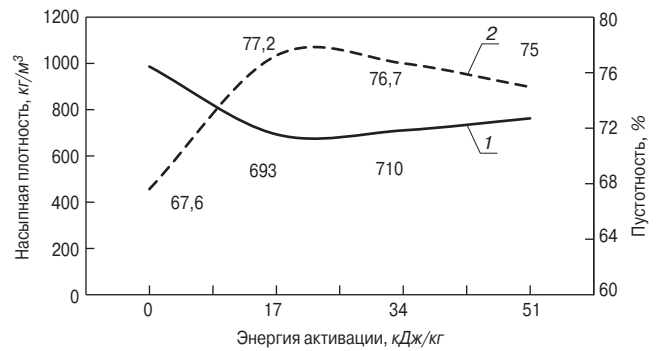


Рис. 2. Изменение агломерации частиц цемента с различной энергией активации: 1 – насыпная плотность; 2 – пустотность

Fig. 2. Change in the agglomeration of cement particles with different activation energies: 1 – bulk density; 2 – emptiness

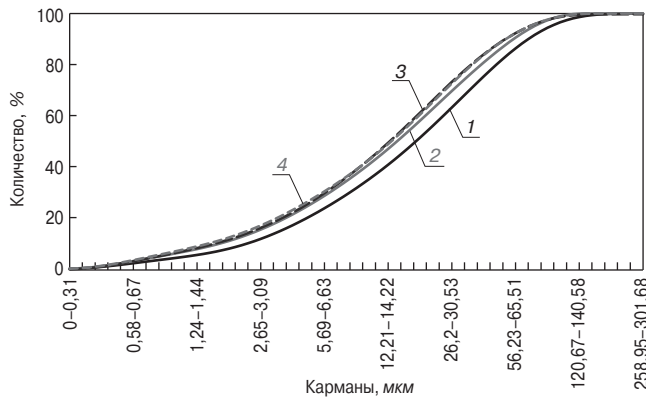


Рис. 3. Интегральная кривая распределения частиц цемента: 1 – контрольный цемент; 2 – цемент с энергией активации 17 кДж/кг; 3 – цемент с энергией активации 34 кДж/кг; 4 – цемент с энергией активации 51 кДж/кг

Fig. 3. Integral distribution curve of cement particles: 1 – control cement; 2 – cement with an activation energy of 17 kJ/kg; 3 – cement with an activation energy of 34 kJ/kg; 4 – cement with an activation energy of 51 kJ/kg

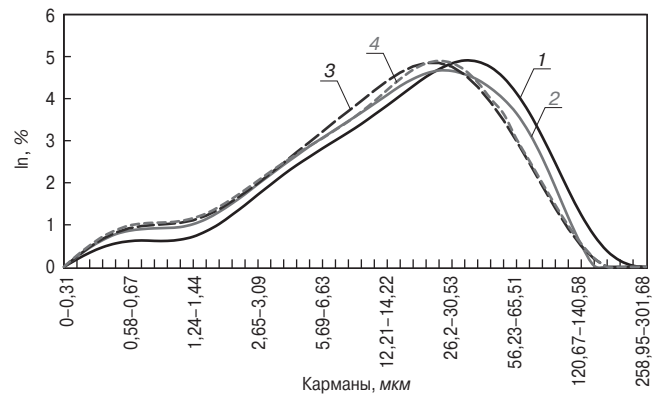


Рис. 4. Дифференциальная кривая распределения частиц цемента: 1 – контрольный цемент; 2 – цемент с энергией активации 17 кДж/кг; 3 – цемент с энергией активации 34 кДж/кг; 4 – цемент с энергией активации 51 кДж/кг

Fig. 4. Differential distribution curve of cement particles: 1 – control cement; 2 – cement with an activation energy of 17 kJ/kg; 3 – cement with an activation energy of 34 kJ/kg; 4 – cement with an activation energy of 51 kJ/kg

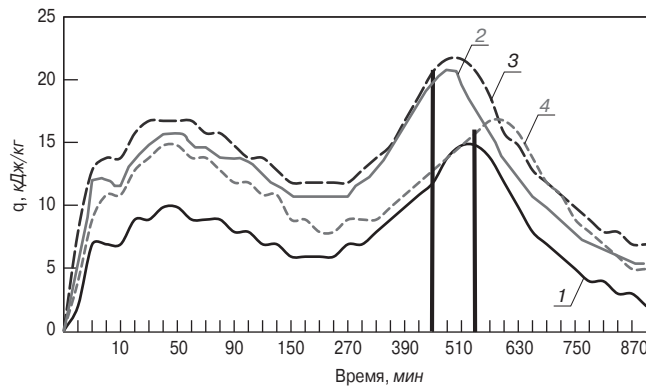


Рис. 6. Выделение энергии при экзотермической реакции в процессе гидратации цемента: 1 – контрольный цемент; 2 – цемент с энергией активации 17 кДж/кг; 3 – цемент с энергией активации 34 кДж/кг; 4 – цемент с энергией активации 51 кДж/кг

Fig. 6. Energy release during an exothermic reaction in the process of cement hydration: 1 – control cement; 2 – cement with an activation energy of 17 kJ/kg; 3 – cement with an activation energy of 34 kJ/kg; 4 – cement with an activation energy of 51 kJ/kg

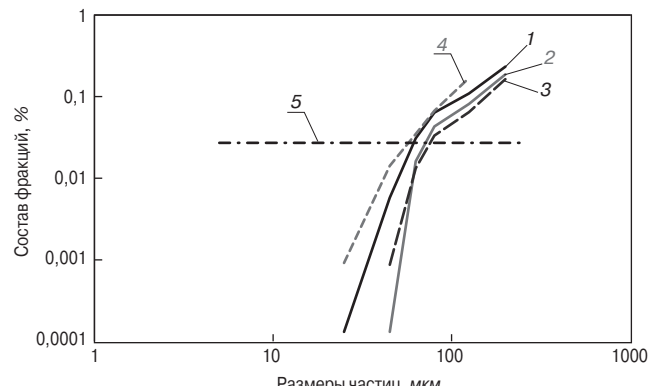


Рис. 5. Распределение Розина–Рамллера частиц цемента с разной энергией активации: 1 – контрольный цемент; 2 – цемент с энергией активации 17 кДж/кг; 3 – цемент с энергией активации 34 кДж/кг; 4 – цемент с энергией активации 51 кДж/кг; 5 – R=36,8%

Fig. 5. Rosin-Rammler distribution of cement particles with different activation energies: 1 – control cement; 2 – cement with an activation energy of 17 kJ/kg; 3 – cement with an activation energy of 34 kJ/kg; 4 – cement with an activation energy of 51 kJ/kg; 5 – R=36.8%

Агрегирование частиц материала, а следовательно, уменьшение площади контакта с молекулами воды объясняется значением разницы между энергией, выделяемой при экзотермической реакции цемента с энергией активации 51 кДж/кг, в сравнении с цементом с энергией активации равной 34 кДж/кг.

Отклонение энергий, выделяемых при экзотермической реакции цемента с энергией активации, равной 17 кДж/кг, в сравнении с цементом с энергией активации, равной 34 кДж/кг, объясняется увеличением дефектности частиц вместе с увеличением активационной энергии (рис. 6).

Выводы

1. Установлено, что каждый последующий проход цемента через дезинтеграторную установку увеличивает число контактов частиц примерно в два раза. При определении удельной поверхности отмечено ее увеличение каждой последующей активации цемента на 12–16% к предыдущему значению, однако активация при третьем проходе материала не приводит к увеличению удельной поверхности, это связано с нарушением кристаллической структуры частиц цемента и с увеличением их свободной энергии, что приводит к агрегированию частиц.

2. Увеличение пустотности активированного цемента связано с воздухововлечением, а следовательно, с увеличением расстояния между частицами активированного цемента. С данным свойством связано также уменьшение насыпной плотности. Увеличение пустотности после первого прохода цемента через дезинтеграторную установку составляет 12,4%.

3. Обнаружено уменьшение фракций частиц 40–63 мкм в сравнении с контрольным цементом: на 5,4% при энергии активации 17 кДж/кг; на 8,7% — при энергии активации 34 кДж/кг; на 8,4% при энер-

гии активации 51 кДж/кг, а также увеличение количества частиц размером менее 10 мкм на 5,4; 7,1 и 7,2% соответственно.

4. Максимальное количество энергии, выделяемой при экзотермической реакции цемента с энергией активации равной 34 кДж/кг, составило 21,6 кДж/кг, что в 1,4 раза больше энергии, выделяемой при экзотермической реакции контрольного образца; также пик тепловой энергии при экзотермической реакции цемента с энергией активации, равной 34 кДж/кг, начинается на 10 мин быстрее в сравнении с контрольным образцом.

5. Отклонение энергий, выделяемых при экзотермической реакции цемента с энергией активации, равной 51 кДж/кг, в сравнении с цементом с энергией активации, равной 34 кДж/кг, объясняется агрегированием частиц материала, а следовательно, уменьшение площади контакта с молекулами воды.

6. Отклонение энергий, выделяемых при экзотермической реакции цемента с энергией активации, равной 17 кДж/кг, в сравнении с цементом с энергией активации, равной 34 кДж/кг, объясняется увеличением дефектности частиц вместе с увеличением активационной энергии.

Список литературы

1. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2018. № 4 (37). С. 85–99.
2. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Baskakova E. Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061
3. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Zamelin D., Pepelyaeva A. Complex method of stabilizing slag suspension. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983, pp. 817–827. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_80
4. Самченко С.В., Егоров Е.С. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты // *Техника и технология силикатов. Международный журнал по вяжущим, керамике, стеклу и эмалям*. 2019. Т. 26. № 2. С. 52–57.
5. Рыбакова М.В., Барбаныгрэ В.Д. Интенсификация процесса твердения цементного камня на основе механоактивированной суспензии. *II Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей: Сборник докладов*. СПб., 2011. С. 140.
6. Кривобородов Ю.Р., Ясько Д.А. Активация цемента для улучшения свойств бетона // *Новая наука: проблемы и перспективы. Сборник статей международной научно-практической конференции*. Стерлитамак: РИЦА МИ. 2015. № 3. С. 105–108.
7. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Влияние гидродинамически активированной добавки кристалло-

References

1. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Modern methods of activation of binder and concrete mixtures (review). *Vestnik of the FEFU Engineering School*. 2018. No. 4 (37), pp. 85–99. (In Russian).
2. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Baskakova E. Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061
3. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Zamelin D., Pepelyaeva A. Complex method of stabilizing slag suspension. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983, pp. 817–827. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_80
4. Samchenko S.V., Egorov E.S. Influence of ultradispersed additive from pre-hydrated cement on the properties of cement paste. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov. Mezhdunarodnyy zhurnal po vyazhushchim*. 2019. Vol. 26. No. 2, pp. 52–57. (In Russian).
5. Rybakova M.V., Barbanyagre V.D. Intensification of the hardening process of cement stone based on mechanically activated suspension. *II International seminar-competition of young scientists and graduate students working in the field of binders, concretes and dry mixes: a collection of reports*. St. Petersburg. 2011. p. 140. (In Russian).
6. Krivoborodov Yu.R., Yasko D.A. Activation of cement to improve the properties of concrete. *New science: problems and prospects. Collection of articles of the International scientific-practical conference*. Sterlitamak: RICA MI. 2015. No. 3, pp. 105–108. (In Russian).
7. Elenova A.A., Krivoborodov Yu.R. Influence of a gyrodynamically activated crystalline hydrate additive

- гидрата на гидратацию и твердение цементного камня. *Успехи в химии и химической технологии: Сб. науч. тр.* 2016. Т. XXX. № 7. С. 36–38.
8. Гуринович Л.С., Усов Б.А. Механохимическая обработка строительных материалов // *Экология и строительство. Scientific Research Center Of Environmental Engineering And Construction*. 2015. Т. 3. № 3. С. 22.
 9. Ставров С.В., Абрамов М.А. Механохимическое получение микронаполнителей для «умных» и многофункциональных бетонов. *Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. 2020. С. 635–638.
 10. Мурог В.Ю., Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. Помольно-классифицирующие мельницы дезинтеграторного типа. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. 3, Химия и технология неорганических веществ*. 2008. С. 113–117.
 11. Злобин И.А., Мандрикова О.С., Борисов И.Н. Способ механического воздействия при помоле как фактор, определяющий формирование качественных характеристик цемента // *Цемент и его применение*. 2016. № 1. С. 158–162.
 12. Гуринович Л.С., Усов Б.А. Механохимическая обработка строительных материалов // *Экология и строительство. Scientific Research Center Of Environmental Engineering And Construction*. 2015. Т. 3. № 3. С. 22.
 13. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2001. 260 с.
 14. Mehrotra S.P., Alex T.C., Greifzu G., Kumar R. Mechanical activation of gibbsite and boehmite. New findings and their implications // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015. 69 (1). С. 51–59. DOI: 10.1007/s12666-015-0633-6
 - on the hydration and hardening of cement stone. *Advances in chemistry and chemical technology: a collection of scientific papers*. 2016. Vol. XXX. No. 7, pp. 36–38. (In Russian).
 8. Gurinovich L.S., Usov B.A. Mechanochemical treatment of building materials. *Ecology and construction. Scientific Research Center Of Environmental Engineering And Construction*. 2015. V. 3. No. 3, p. 22. (In Russian).
 9. Stavrov S.V., Abramov M.A. Mechanochemical production of microfillers for “smart” and multifunctional concretes. *Young scientists – Development of the National Technology Initiative (POISK)*. 2020, pp. 635–638. (In Russian).
 10. Murog V.Yu., Vaitekovich P.E., Borovsky D.N. Grinding-classifying mills of the disintegrator type. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 3. Chemistry and technology of inorganic substances*. 2008, pp. 113–117. (In Russian).
 11. Zlobin I.A., Mandrikova O.S., Borisov I.N. The method of mechanical action during grinding as a factor determining the formation of qualitative characteristics of cement. *Tsement i yego primeneniye*. 2016. No. 1, pp. 158–162. (In Russian).
 12. Gurinovich L.S., Usov B.A. Mechanochemical treatment of building materials. *Ecology and construction. Scientific Research Center Of Environmental Engineering And Construction*. 2015. Vol. 3. No. 3, p. 22. (In Russian).
 13. Promtov M.A. Pul'satsionnyye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika [Pulsation devices of rotary type: theory and practice]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publishing House. 2001. 260 p.
 14. Mehrotra S.P., Alex T.C., Greifzu G., Kumar R. Mechanical activation of gibbsite and boehmite. New findings and their implications. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015. 69 (1). С. 51–59. DOI: 10.1007/s12666-015- 0633-6

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 (практ. руководство под ред. д.г.-м.н. Шашкина А.Г.) Санкт-Петербург: Георекострукция, 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: georeconstruction@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»

УДК 693.614

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-37-41>

А.Д. ЖУКОВ¹, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru);
 И.В. БЕССОНОВ², канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);
 А.В. КУЛАПИН³, инженер (аспирант) (andrej.kulapin@henkel.com);
 А.А. МЕДВЕДЕВ¹, канд. техн. наук (medvedev747@yandex.ru),
 Б.А. ДЕМИССЕ¹, инженер (аспирант) (aregabekalu@gmail.com),
 Р.С. ПОУДЕЛ¹, инженер (аспирант) (unlessmoney00@gmail.com)

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

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук
 (НИИСФ РААСН) (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21.)

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)
 (190005, г. Санкт-Петербург, 3-я Красноармейская ул., 3/6)

Фасадные штукатурные системы с применением модифицированного вяжущего

Штукатурные системы, наносимые на поверхности фасадов с применением армирующих сеток, можно рассматривать как разновидность текстиль-бетона. Этот материал состоит из минерального вяжущего, наполнителя (или мелкого заполнителя) и армирующих компонентов. Подобные решения используют в системах фасадных теплоизоляционных композиционных, а также по бетонному основанию (без утепления стены). Возможно применение по любой поверхности при реконструкции фасадов зданий. Помимо декоративных характеристик и внешней выразительности, фасадные системы и материалы должны соответствовать требованиям по долговечности и эксплуатационной стойкости в условиях климатических воздействий: солнечного облучения, осадков, знакопеременной и отрицательной температуры. Целью исследования явилось изучение свойств армированных штукатурных покрытий на основе модифицированного вяжущего. В его состав была включена тонкомолотая минеральная добавка на основе вулканического туфа; также в состав фасадной смеси входили модифицирующие добавки: эфиры целлюлозы, редиспергируемый порошок, порообразователь, загуститель, гидрофобизатор. Установлено, что вне зависимости от применяемой теплоизоляции (минераловатных фасадных плит или плит на основе вспененных пластмасс) система покрытий на основе минеральных штукатурок, армированных сетками, выполняет защитные функции по отношению к изоляционным слоям. Во-первых, это защита от атмосферных воздействий; во-вторых, защита от вандализма; в-третьих, защита от возможного огневого воздействия, что особенно важно в случае применения горючей теплоизоляции. Исследование свойств покрытия в режимах, имитирующих реальное применение систем, при температурно-влажностных воздействиях показало снижение прочности сцепления с основанием на 9–13%. Внешних изменений на лицевой поверхности образцов – изменения цвета, появления трещин и сколов, шелушения не обнаружено.

Ключевые слова: фасадное покрытие, вулканический туф, модифицированное вяжущее, армированная штукатурка.

Исследования проводились в рамках реализации НИОКТР «Развитие научных основ создания мелкозернистых бетонов, армированных текстильным материалом (текстиль-бетонов)». Код научной темы – 3.1.2.1. Исполнитель НИИСФ РААСН.

Для цитирования: Жуков А.Д., Бессонов И.В., Кулапин А.В., Медведев А.А., Демиссе Б.А., Поудел Р.С. Фасадные штукатурные системы с применением модифицированного вяжущего // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 37–41.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-37-41>

A.D. ZHUKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru); I.V. BESSONOV², Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru);
 A.V. KULAPIN³, graduate student; A.A. MEDVEDEV¹, Candidate of Sciences (Engineering), (medvedev747@yandex.ru),
 B.A. DEMISE¹, graduate student, R.S. POUDEL¹, graduate student

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

² Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

³ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) (3/6, 3rd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005, Russian Federation)

Facade Plastering Systems Using a Modified Binder

Plaster systems applied to facade surfaces using reinforcing meshes can be considered as a kind of textile concrete. This material consisting of a mineral binder (or fine aggregate) and reinforcing components. Similar coatings are used in facade heat-insulating composite systems, as well as on a concrete base (without wall insulation). Can be used on any surface during the reconstruction of building facades. Facade systems and materials must meet the requirements for durability and operational stability under climatic influences: solar radiation, precipitation, alternating and negative temperatures. The aim of the study was to study the properties of reinforced plaster coatings based on a modified binder. The composition of the modified binder included a finely ground mineral additive based on volcanic tuff; the composition of the facade mixture also included modifying additives: cellulose ethers, dispersible powder, blowing agent, thickener, water repellent. It has been established that, regardless of the thermal insulation used (mineral wool facade slabs, or slabs based on foamed plastics), the system of plaster coatings based on mineral plasters reinforced with meshes performs protective functions in relation to the insulating layers. Firstly, it is weather protection, sec-

only, it is protection against vandalism, and thirdly, it is protection against possible fire impact, which is especially important in the case of combustible thermal insulation. The decrease in adhesion strength (adhesion) after cyclic temperature and humidity exposures was 9–13%. Upon completion of cyclic exposures, no external changes were detected on the front surface of the samples (color, cracks, chips, peeling).

Keywords: volcanic tufa, facade coating, modified binder, reinforced plaster.

The research was carried out as part of the implementation of the R&D “Development of the scientific foundations for the creation of fine-grained concrete reinforced with textile material (textile concrete)”. Scientific topic code – 3.1.2.1. Performed by Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences.

For citation: Zhukov A.D., Bessonov I.V., Kulapin A.V., Medvedev A.A., Demisse B.A., Poudel R.S. Facade plastering systems using a modified binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 37–41. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-37-41>

Современное штукатурное покрытие может рассматриваться как система, включающая несколько слоев, в том числе шпаклевочный слой, промежуточный штукатурный и финишную отделку. В ответственных конструкциях или там, где возможна концентрация напряжений, а также при нанесении толстых слоев штукатурное покрытие армируется монтажными сетками, изготавливаемыми из стекловолокна, гибридного волокна, синтетических материалов [1–3].

В состав промежуточного и финишного штукатурных слоев может входить мелкий наполнитель (фракционированный кварцевый песок или его аналоги, пористые пески), что дает возможность рассматривать подобные системы как разновидность текстиль-армированного бетона. Отметим, что эта аналогия близка еще и тем, что, как и в случае использования текстиль-армированного бетона, толщина штукатурной системы редко превышает 50 мм на плотных заполнителях и 100 мм на пористых, а текстиль-армированный бетон при его торкрет-нанесении на минеральные поверхности выполняет функцию усиления конструкции, а именно толстослойного штукатурного покрытия с дополнительными функциями [4–6].

В штукатурных системах с утеплением, в которых применяются теплоизоляционные слои из минераловатных фасадных плит, изделий из экструзионного пенополистирола или пенополиизоцианурата, значительное усложнение изоляционной системы предполагает обязательное применение армирования сетками по глади стены с дополнительным усилением в трещиноподобных местах. Системы с утеплением позволяют ограничивать тепловые потери в холодный период и сокращать расходы на кондиционирование в условиях жаркого климата [7–9].

В том случае, если несущая стена выполняется из блоков или камней, имеющих относительно низкую теплопроводность (блоков из ячеистого бетона, бетона на легких заполнителях, блоков из туфа или известняка-ракушечника, керамических камней), становится целесообразным применение легких (или теплоизоляционных) штукатурных систем. В этих системах промежуточный штукатурный слой выполняется из смесей, содержащих мелкий легкий наполнитель: вспученные перлит или вермикулит, вулканические пористые материалы, вспененный отсев полистирола.

Применение таких штукатурных систем позволяет без устройства специальных теплоизоляционных слоев достигать термического сопротивления по глади изолируемой стены, обеспечивающее требуемый уро-

вень комфортности и нормативное термическое сопротивление. Армирование таких систем монтажными сетками обязательно; возможно послойное армирование в рамках реализации аддитивных технологий.

Основными свойствами штукатурного покрытия являются обеспечение декоративности и защита несущих конструкций от атмосферных воздействий. Покрытие должно обладать хорошей адгезией к различным основаниям (от минеральных до полимерных); высокими паропроницаемостью и трещиностойкостью. Это достигается использованием специальных добавок, подбором фракционированного мелкого заполнителя и наполнителя, а также за счет выбора вяжущего вещества.

В фасадных системах используется или известково-цементное вяжущее, или вяжущее на основе портландцемента; осваиваются технологии применения полимергипсовых и полимерцементных композиций.

Особый интерес представляют материалы, в которых могут использоваться пуццолановые активные минеральные добавки. Портландцементный клинкер, являющийся весьма энергоемким и недешевым материалом, может быть частично заменен введением минеральных добавок, обладающих пуццолановой активностью. Такие материалы подразделяются на добавки с высокой, средней и низкой пуццолановой активностью [10, 11].

Туфы являются продуктом вулканических извержений, используются в качестве строительного стенового материала и для отсыпки дорог. Туфы как минеральная добавка в портландцемент эффективны с точки зрения улучшения реологических свойств цементного теста и свойств смешанного вяжущего в затвердевшем состоянии [12, 13].

По результатам эксперимента и аналитической обработки данных установлено, что оптимальные значения расхода туфа-скории находятся в интервале от 116 до 140 кг/м³. Полученная в результате графической интерпретации алгебраического полинома номограмма позволяет определять оптимальные расходы компонентов и может быть использована при разработке методики подбора состава композиционного вяжущего. Активность туфа по поглощению CaO составляет (в зависимости от месторождения) от 240 до 320 мг/г, что позволяет отнести этот материал к добавкам, обладающим средней пуццолановой активностью. Наличие в некоторых видах туфов минералов, обладающих свойствами цеолитов, также повышает привлекательность этого материала [14–16].

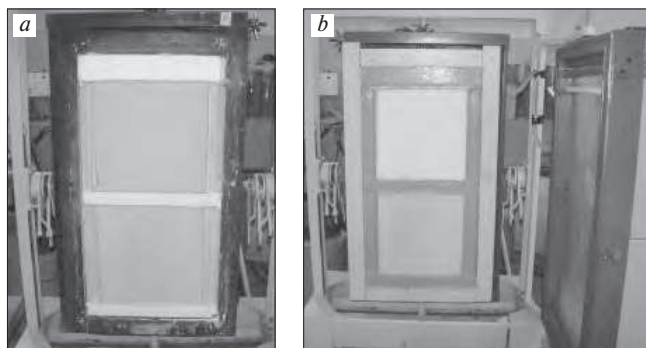


Рис. 1. Испытания фрагментов бетонных плит с нанесенными составами облицовочно-декоративных систем по бетонному основанию (а) и по керамической плитке (b) в холодильно-дождевальной установке ХДУ-02 «Термоизоляция»

Fig. 1. Testing of fragments of concrete slabs with applied compositions of cladding and decorative systems on a concrete base (a) and on ceramic tiles (b), in a refrigeration and sprinkling installation XDU-02 «Thermoisolation»

Целью исследования было изучение свойств армированных штукатурных покрытий на основе модифицированного вяжущего. В его состав была включена тонкомолотая минеральная добавка на основе вулканического туфа; также в состав фасадной смеси входили модифицирующие добавки: эфиры целлюлозы, редиспергируемый порошок, порообразователь, загуститель, гидрофобизатор.

Материалы и методы

Методика испытаний заключается в создании условий искусственного старения образцов (фрагмента конструкций) в результате имитации различных атмосферных нагрузок. Образцы помещались в камеру и подвергались циклическим температурно-влажностным воздействиям. Солнечное облучение инфракрасного спектра моделировалось посредством лучистого действия нагревательного прибора, нагревающего поверхности фрагмента конструкции. Атмосферные осадки моделировались увлажнением. Воздействие отрицательной температуры моделировалось замораживанием, при этом обеспечивалось промерзание и оттаивание наружной поверхности фасадной системы на 20–25 мм.

В эксперименте моделировались атмосферные условия, характерные для средней климатической зоны и климатических условий г. Москвы. Количество обобщенных циклов заморозок–оттепель для фасадов в этих климатических условиях было при-

нято равным четырнадцати и устанавливалось по результатам обработки многолетних метеорологических данных обсерватории МГУ, лаборатории НИИМосстрой и лаборатории НИИСФ. Проведено 420 циклов воздействия с температурным перепадом от -20 до $+60^{\circ}\text{C}$, а также параллельно проведено 300 циклов с температурным перепадом от -40 до $+70^{\circ}\text{C}$.

Использовались два вида основания: бетонное основание и керамическая плитка. Испытания фрагментов с нанесенными на основания составами облицовочно-декоративных систем осуществлялись в холодильно-дождевальной установке ХДУ-02 «Термоизоляция» (рис. 1). Цикл в установке ХДУ-02 включал увлажнение, замораживание при -25°C , нагрев до $+60^{\circ}\text{C}$ при ИК- и УФ-облучении. Количество циклов испытаний было 420.

Последовательность подготовки и проведения испытания фрагментов бетонных плит с нанесенными составами облицовочно-декоративных систем в климатической камере термоудара TSK300 представлена на рис. 2. Подготовка заключалась в увлажнении наружной поверхности образца путем погружения его в воду на 24 ч. Цикл испытания состоял из следующих этапов: замораживание до -40°C в течение 3 ч, нагрев до $+70^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч. Количество циклов было принято 300.

Результаты и обсуждение

По завершении циклических воздействий проведен визуальный осмотр образцов и экспериментальные определения прочности сцепления слоев (адгезии). Внешних изменений на лицевой поверхности образцов (цвет, трещины, сколы, шелушение) не обнаружено. Усредненные результаты экспериментальных определений прочности сцепления слоев (адгезии) на основных и контрольных образцах с прорезами до бетонного основания (по периметру наклеиваемых металлических пластин) представлены в таблице.

Визуальный осмотр образцов показал отсутствие изменений внешнего вида, цвета, трещин, каверн и пр. Снижение прочности сцепления (адгезии) составило соответственно: в системе 2 – 9%; в системе 3 – 12%; в системе 4 – 13%. Во всех основных сериях разрушение происходило с отрывом плитки, что



Рис. 2. Подготовка (а) и проведение испытания фрагментов в климатической камере термоудара TSK300 (b, c)

Fig. 2. Preparation (a) and testing of fragments in a TSK300 thermal shock chamber (b, c)

**Характеристики отрыва защитного покрытия в различных системах
Peel-off characteristics of the protective coating in various systems**

| Номер системы | Характеристики | Тип серии образцов | |
|---------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| | | Основная | Контрольная |
| 1 | Прочность сцепления, МПа | 1,2 | 0,93 |
| | Характер отрыва | По сетке в штукатурно-армирующем слое | По слою декоративной штукатурки |
| 2 | Прочность сцепления, МПа | 0,98 | 1,08 |
| | Характер отрыва | Отрыв плитки | Отрыв плитки |
| 3 | Прочность сцепления, МПа | 0,77 | 0,88 |
| | Характер отрыва | Отрыв плитки | По слою декоративной штукатурки |
| 4 | Прочность сцепления, МПа | 0,86 | 0,99 |
| | Характер отрыва | Отрыв плитки | По слою декоративной штукатурки |

подтверждает высокую адгезию защитного покрытия к основанию.

В системе 1 имело место увеличение прочности сцепления после циклических климатических воздействий, а разрушение происходило в основной по сетке в штукатурно-армирующем слое, а в контрольной – по слою декоративной штукатурки. Это также подтвердило высокую адгезию защитного покрытия к бетонному основанию. Повышение прочности сцепления в результате климатических воздействий, видимо, было связано более глубокой гидратацией вяжущего в покрытии в условиях влажной среды и циклического повышения температуры.

Расширение сферы применения строительных материалов и систем, аналогичных текстиль-бетону, по своей структуре и составу является перспективным направлением развития строительной отрасли. Результат – повышение долговечности и эксплуатационной стойкости фасадных систем как один из факторов повышения их энергоэффективности. Увеличение срока эксплуатации конструкции снижает частоту капитальных ремонтов, а следовательно, и расходы на ее эксплуатацию.

Вторым компонентом, обуславливающим повышение энергетической эффективности, является возможность применения рассмотренных решений в системах фасадных теплоизоляционных композиционных, предусматривающих монтаж теплоизоляционного слоя и финишного защитно-декоративного покрытия по армирующей сетке. В качестве теплоизоляции могут применяться негорючие плиты на основе каменной ваты или же плиты из экструзионного пенополистирола.

Пенополистирольные плиты применяются на цокольной части здания и в областях фасада, куда возможно проникновение (в том числе и за счет капиллярных явлений) грунтовой влаги. В том случае, если плиты экструзионного пенополистирола монтируют по глади стены, обязательны противопожарные рассечки на уровне междуэтажных перекрытий, а также по периметру оконных и дверных проемов. Рассечки выполняются из полос негорючей теплоизоляции.

Вне зависимости от применяемой теплоизоляции система штукатурных покрытий на основе минеральных штукатурок, армированных сетками, выполняет защитные функции по отношению к изоляционным слоям. Во-первых, это защита от атмосферных воздействий; во-вторых, это защита от вандализма; в-третьих, это защита от возможного огневого воздействия, что особенно важно в случае применения горючей теплоизоляции.

Установлено, что после циклических температурно-влажностных воздействий снижение прочности сцепления (адгезии) составило 9–13%. По завершении циклических воздействий внешних изменений на лицевой поверхности образцов (цвет, трещины, сколы, шелушение) не обнаружено.

Системы фасадной облицовочно-декоративной строительной системы, являющейся частным случаем текстиль-бетонного материала, в полной мере прошли комплексные климатические испытания. Фасадные системы защиты по бетонному основанию и по керамической плитке выдержали температурно-влажностные циклические воздействия, эквивалентные тридцати условным годам эксплуатации. Это позволяет рекомендовать подобные конструктивные решения при реконструкции фасадов зданий и в частных случаях при новом строительстве, в том числе в системах фасадных теплоизоляционных композиционных.

Заключение

Армированные штукатурные покрытия по основным признаками могут рассматриваться как разновидность текстиль-бетона; гидравлическое вяжущее с наполнителями, армированное стеклянкой сеткой или сеткой из полиэстера.

Использование армированных штукатурных покрытий при ремонте фасадов зданий позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики усиленного фасада; при этом сохраняется хорошая адгезия армированного штукатурного покрытия к материалу основания.

В случае использования армированных фасадных штукатурок в системах фасадных теплоизоляцион-

ных композиционных с теплоизоляционным слоем из минераловатных плит или комбинированной теплоизоляцией с применением экструзионного пенополистирола достигается термическое сопротивление конструкций, соответствующее региональным нормативным требованиям.

Список литературы / References

1. Теличенко В.И., Орешкин Д.В. Материаловедческие аспекты геоэкологической и экологической безопасности в строительстве // *Экология урбанизированных территорий*. 2015. № 2. С. 31–33.
1. Telichenko V.I. Oreshkin D.V. Materials science aspects of geoeological and environmental safety in construction. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2015. No. 2, pp. 31–33. (In Russian).
2. Gudkov P., Kagan P., Pilipenko A., Zhukova E.Yu., Zinovieva E.A., Ushakov N.A. Usage of thermal isolation systems for low-rise buildings as a component of information models. *E3S Web Conf. XXII International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2019)*. Vol. 97. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199701039>
3. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.-B., Dosanova G., Ekaterina B. Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web Conf. International Science Conference SPbWOSCE-2018 "Business Technologies for Sustainable Urban Development"*. 2019. Vol. 110. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032>
4. Gelbrich S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textil-bewehrtem Beton und glasfaserverstrktem Kunststoff. *Leichter bauen – Zukunft formen. TUDALIT*. 2012. No. 7, pp. 9.
5. Демиссе Б.А., Жуков А.Д., Поудел Р.С. Мелкозернистый бетон на модифицированном вяжущем // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 3. С. 31–36. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.31-36
5. Demisse B.A., Zhukov A.D., Poudel R.S. Fine-grained concrete on a modified binder. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2022. No. 3, pp. 31–36. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.31-36
6. Муртазаев С.-А.Ю., Батаев Д.К.-С., Исмаилова З.Х. Мелкозернистые бетоны на основе наполнителей из вторичного сырья. М.: Комтехпринт, 2017. 142 с.
6. Murtazaev S.-A.Yu., Bataev D.K.-S., Ismailova Z.Kh. [Melkozernistyye betony na osnove napolnitelej iz vtorichnogo syr'ya [Fine-grained concrete based on fillers from secondary raw materials]. Moscow: Komtekhprint. 2017. 142 p.
7. Davood Mostofinejad, Seyed Mohammad Hosseini, Farzaneh Nosouhian, Togay Ozbakkaloglu, Bahareh Nader Tehrani. Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment. *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 29, pp. 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101182>
8. Румянцев Б.М., Жуков А.Д. Эксперимент и моделирование при создании новых изоляционных и отделочных материалов. Электрон. текстовые данные. М.: МГСУ, ЭБС АСВ, 2013. 156 р.
8. Rummyantsev B.M., Zhukov A.D. Eksperiment i modelirovanie pri sozdanii novykh izolyacionnyh i otlochnykh materialov [Experiment and modeling in the creation of new insulation and finishing materials]. Moscow: MGSU. EBS ASV. 2013. 156 p.
9. Shannag M., Charif A., Naser S., Faisal F., Karim A. Structural behavior of lightweight concrete made with scoria aggregates and mineral admixtures. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 14. No. 12, pp. 105–109.
10. Мешков П.И., Мокин В.А. Способы оптимизации составов сухих строительных смесей // *Строительные материалы*. 2000. № 5. С. 12–14.
10. Meshkov P.I., Mokin V.A. Ways to optimize the composition of dry building mixes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2000. No. 5, pp. 12–14. (In Russian).
11. Almusaed A., Almassad A., Alasadi A. Analytical interpretation of energy efficiency concepts in the housing design process from hot climate. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 21, pp. 254–266. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.10.026
12. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2020. Т. 12. № 6. С. 313–319. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
12. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demissi B.A. Application of statistical methods for solving problems of building materials science. *Nanotechnologii v stroitel'stve: scientific online journal*. 2020. Vol. 12. No. 6, pp. 313–319. (In Russian). DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
13. Biao Li, Shaodan Hou, Zhenhua Duan, LongLi, Wei Guo Rheological behavior and compressive strength of concrete made with recycled fine aggregate of different size range. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268, pp. 5–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121172>
14. Velichko E., Shokodko E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. 01042. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101042>
15. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete. A review. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24, pp. 2060–2071. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014
16. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Demissi B.A., Zinovieva E.A. Analytical optimization of the dispersion-reinforced fine-grained concrete composition. *CATPID 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1083. 012037. doi:10.1088/1757-899X/1083/1/012037

И.В. КОЗЛОВА, канд. техн. наук (iv.kozlova@mail.ru),
О.В. ЗЕМСКОВА, канд. хим. наук (ov.zemskova@yandex.ru),
Н.А. ЛЕКАНОВ, студент (lekanoff.02@yahoo.com)

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

Варианты введения тонкодисперсной добавки на основе перлита в цементные композиции

Рассмотрены варианты введения тонкодисперсной добавки перлита в состав цементной системы. Одним из вариантов введения тонкодисперсного перлита является сухое смешивание добавки с цементом с последующим затворением водой с поликарбоксилатным пластификатором. Вторым вариантом – введение в цемент стабилизированной суспензии тонкодисперсного перлита. Установлено, что наибольшей агрегативной и седиментационной устойчивостью обладают суспензии с содержанием тонкодисперсного перлита 1–3% и поликарбоксилатного пластификатора 0,3–0,5%, подверженные ультразвуковой обработке. Выявлено, что гомогенизация суспензии обеспечивается за счет ультразвукового воздействия, стабилизация достигается за счет закрепления на поверхности частиц тонкодисперсного перлита функциональных групп поликарбоксилата. Применение комплексного метода гомогенизации и стабилизации суспензии способствует равномерности распределения частиц перлита в объеме цементной системы, что приводит к ускорению гидратационных процессов в структуре и увеличению физико-механических характеристик цементного камня. Отмечается увеличение прочности при сжатии модифицированных образцов более чем в два раза в первые сутки твердения и на 56% в марочном возрасте по сравнению с бездобавочным цементом. При сравнении с цементным образцом, содержащим поликарбоксилатный пластификатор, наблюдается увеличение прочности модифицированного образца на 47% в первые сутки твердения и на 19% в марочном возрасте.

Ключевые слова: тонкодисперсная добавка, перлит, цементные композиции, сухое смешивание, ультразвуковая обработка, стабилизация, степень гидратации.

Для цитирования: Козлова И.В., Земскова О.В., Леканов Н.А. Варианты введения тонкодисперсной добавки на основе перлита в цементные композиции // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-42-49>

I.V. KOZLOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (iv.kozlova@mail.ru),
O.V. ZEMSKOVA, Candidate of Sciences (Chemistry) (ov.zemskova@yandex.ru),
N.A. LEKANOV, Student (lekanoff.02@yahoo.com)
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Options for the Introduction of a Finely Dispersed Additive Based on Perlite into Cement Mixtures

The article discusses the options for introducing a fine perlite additive into the composition of a cement system. One of the options for the introduction of fine perlite is dry mixing of the additive with cement, followed by mixing with water with a polycarboxylate plasticizer. The second option is the introduction of a stabilized suspension of finely dispersed perlite into the cement. It was found that suspensions with a fine perlite content of 1–3% and polycarboxylate plasticizer 0.3–0.5%, subjected to ultrasonic treatment, have the greatest aggregative and sedimentation stability. It was revealed that the homogenization of the suspension is ensured by ultrasonic exposure, stabilization is achieved by fixing the functional groups of polycarboxylate on the surface of fine perlite particles. The use of a complex method of homogenization and stabilization of the suspension contributes to the uniformity of the distribution of perlite particles in the volume of the cement system, which leads to an acceleration of hydration processes.

Keywords: fine additive, perlite, cement compositions, dry mixing, ultrasonic treatment, stabilization, degree of hydration.

For citation: Kozlova I.V., Zemskova O.V., Lekanov N.A. Options for the introduction of a finely dispersed additive based on perlite into cement mixtures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 42–49. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-42-49>

В настоящее время разработке новых технологий производства строительных материалов и изучению процессов структурообразования в разработанных материалах уделяется особое внимание. Развитие российского производства качественных строительных материалов является приоритетной задачей на несколько лет. Придается особое значение применению недефицитного сырья природного и техногенного происхождения. Одним из видов такого недефицитного сырья для производства строительных материалов различного назначения является пер-

лит — разновидность вулканических стекол, продукт вулканической деятельности [1–4]. В России его месторождения имеются в Приморском крае, Бурятии, на Камчатке.

Перлит обладает малой плотностью, и при температуре 850–1200°C из него получают вспученный материал, который используется в производстве тепло- и звукоизолирующих строительных материалов [5–9].

Также отмечают адсорбционные, огнезащитные, противорадиационные и обеззараживающие

свойства перлита [10–17], что расширяет сферу его использования в производстве строительных материалов. Отмечается применение перлита в составе бетонов, магнезиальных вяжущих, сухих строительных смесей, в качестве сырьевого компонента в производстве цементного клинкера и различного вида композиционных материалов [18–24]. Также ученые рассматривают перлит в качестве тонкодисперсного компонента и изучают его влияние на структурообразование цементной системы [25–30].

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о перспективности использования перлита в производстве строительных материалов.

В настоящей работе уделяется внимание тонкодисперсному перлиту и возможности его введения в состав цементной системы. В ряде работ [31–33] отмечены трудности распределения тонкодисперсного компонента в объеме цементной композиции и найдены пути решения данной проблемы. На основании этих исследований в настоящей статье будут рассмотрены варианты введения тонкодисперсного перлита в состав цемента и проведен анализ полученных результатов исследования.

Материалы и методы исследования

Объектом исследований является тонкодисперсный перлит месторождения Мухор-Тала (Республика Бурятия). Технологическая схема получения тонкодисперсного перлита представлена на рис. 1, химический и гранулометрический состав перлита представлен в табл. 1 и 2.

Из данных табл. 2 следует, что полученный в лабораторной струйной мельнице тонкодисперсный перлит имеет преобладающий размер полифракционного состава 1–3 мкм, который определяли с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц Mastersizer 3000.

Для достижения поставленных задач готовились цементные образцы из портландцемента ЦЕМ I 42,5Н (АО «Подольск-цемент», ГОСТ 31108–2020) 20×20×20 мм, содержащие тонкодисперсный перлит в виде сухо-



Рис. 1. Технологическая схема получения тонкодисперсного перлита. *Фото взято из открытого источника информации

Fig. 1. Technological scheme for the production of fine pyrite. *Photos from an open source of information

го компонента и стабилизированной суспензии в количествах 1, 3, 5, 7, 10% от содержания портландцемента.

Для достижения стабилизации тонкодисперсных частиц перлита применялось ультразвуковое диспергирование на приборе УЗДН-I и введение поликарбонатного пластификатора.

Результаты исследований

Тонкодисперсные частицы перлита с размером частиц 1–3 мкм относятся к субмикронным, вследствие чего склонны к агрегированию. Для установления агрегативной и седиментационной устойчивости приготовленные суспензии переливали в цилиндры $V=100 \text{ см}^3$ и наблюдали за процессом седиментации. Установлено, что седиментация частиц перлита происходит в три стадии. Сначала интенсивно оседают более крупные частицы перлита; на второй стадии происходит осветление дисперсионной среды; на третьей стадии процесс седиментации перлита завершается. По полученным данным строились графики зависимости скорости оседания частиц от концентрации тонкодисперсного перлита (рис. 2).

Из представленных результатов следует, что наиболее устойчивы суспензии с содержанием тонкодисперсного перлита 1–3%, стабилизированные пластификатором в количествах 0,3–0,5%. Устойчивость суспензий, стабилизированных пластификатором и ультразвуковой обработкой (УЗО), увеличилась практически в два раза во все периоды оседания тонкодисперсных частиц. Это свидетельствует об эффективности предложенного метода гомогенизации и стабилизации тонкодисперсных частиц.

Таблица 1
Table 1

Усредненный химический состав аморфного перлита
Average chemical composition of amorphous perlite

| Компонент | Содержание, % | Компонент | Содержание, % |
|--------------------------------|---------------|-------------------|---------------|
| SiO ₂ | 70,4 | MgO | 0,3 |
| Al ₂ O ₃ | 14,7 | TiO ₂ | 0,1 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,7 | K ₂ O | 3,9 |
| FeO | 0,4 | Na ₂ O | 3,4 |
| CaO | 0,8 | H ₂ O | 5,3 |

Таблица 2
Table 2

Гранулометрический состав тонкодисперсного перлита
Granulometric composition of fine pyrite

| Размер частиц, мкм | Содержание фракций, мас. % | Размер частиц, мкм | Содержание фракций, мас. % |
|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| 0–1 | 8 | 7–10 | 10 |
| 1–3 | 36 | 10–15 | 8 |
| 3–5 | 14 | 15–20 | 7 |
| 5–7 | 13 | 20–30 | 4 |

В данном случае гомогенизация суспензии достигается за счет ультразвукового воздействия, а стабилизация перлита – за счет закрепления на поверхности его частиц функциональных групп поликарбоксилата. Неполярная составляющая стабилизатора обеспечивает образование высоковязкой прослойки между частицами перлита и дисперсионной средой, а полярная составляющая способствует формированию двойного электрического слоя (ДЭС), способствующего мицеллообразованию перлита.

Молекулы поликарбоксилатного эфира, концентрируясь в поверхностном слое перлита, образуют гелеобразные пленки из радикалов основной цепи, обладающие повышенными структурно-механическими и гидродинамическими свойствами, что обеспечивает стабилизацию тонкодисперсных частиц перлита. Пленки обладают механической прочностью, упругими свойствами и при сближении частиц мешают их слипанию или слиянию, что обуславливает структурно-механический фактор агрегативной устойчивости.

Для проведения сравнительного анализа вариантов введения тонкодисперсного перлита в состав цементной системы готовились образцы:

– цементных смесей с тонкодисперсным перлитом с последующим затворением их водой и водой, содержащей пластификатор, на основе поликарбоксилатного эфира;

– затворением цемента водными и стабилизированными суспензиями перлита.

Полученные результаты исследований представлены в табл. 3 и 4.

При исследовании цементного теста (табл. 3) было отмечено, что введение тонкодисперсного перлита незначительно увеличивает его водопотребность и не приводит к увеличению вязкости системы. Пластификатор проявляет водоредуцирующее действие, за счет чего снижается водопотребность цементного теста на 16%. В присутствии комплексной добавки, содержащей пластификатор и тонкодисперсный перлит в количестве 1–5%, нормальная густота снижается на 18–20%.

При введении тонкодисперсного перлита в состав цемента наблюдается замедление сроков схватывания. Чем большее количество добавки вводилось, тем заметнее замедление схватывания. При введении в цемент стабилизированной суспензии перлита (только с УЗО и с УЗО+стабилизатор) замедление происходит в меньшей степени, чем в цементной композиции, полученной смешиванием цемента с тонкодисперсным перлитом с последующим затворением как водой, так и водой в присутствии пластификатора. Вероятно, в стабилизированной суспензии перлита как за счет только ультразвукового воздействия, так и комплексного воздействия поликарбоксилатного пластификатора и ультразвуковой обработки частицы сохранили свой размер и распределились более равномерно в

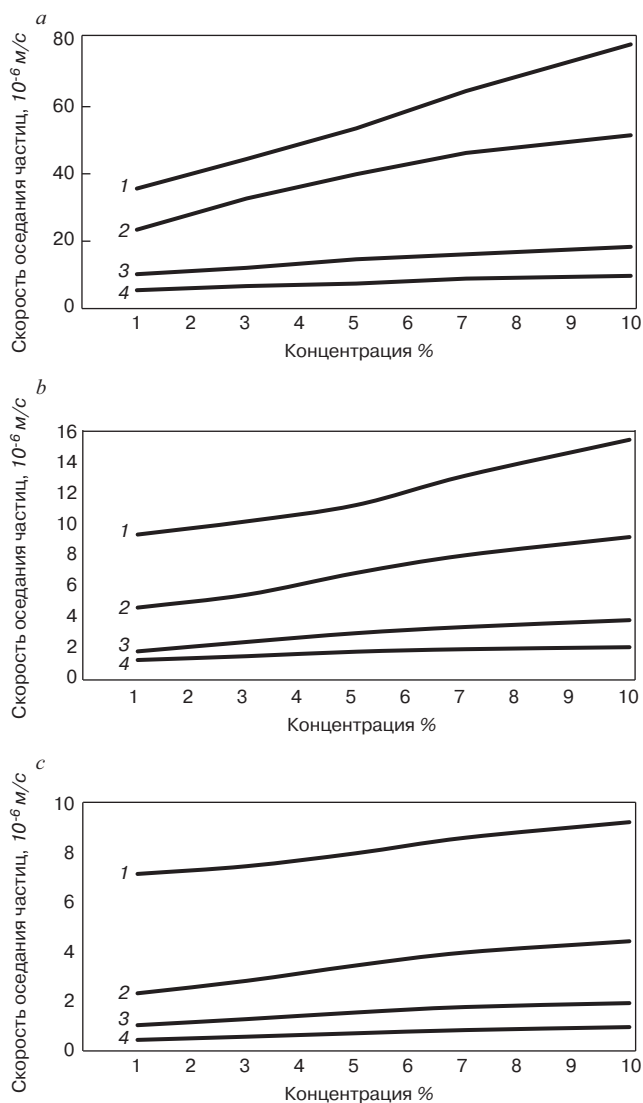


Рис. 2. Зависимость скорости оседания частиц от концентрации тонкодисперсного перлита: а – I период оседания частиц; б – II период оседания частиц; в – III период оседания частиц; 1 – водная суспензия; 2 – водная суспензия+0,1% СП; 3 – водная суспензия+0,3% СП; 4 – водная суспензия+0,5% СП

Fig. 2. The particle settling rate depends on the concentration of fine perlite: а – I the period of particle settling; б – II the period of particle settling; в – III the period of settling of particles; 1 – aqueous suspension; 2 – aqueous suspension+0.1% SP; 3 – aqueous suspension+0.3% SP; 4 – aqueous suspension+0.5% SP

объеме дисперсионной среды, что обеспечивает при введении в цементную систему равномерность распределения компонентов в ее объеме.

При исследовании физико-механических и структурных характеристик цементного камня (табл. 4) установлено, что введение тонкодисперсного перлита разными способами в состав цемента обеспечивает увеличение прочности при сжатии и степень гидратации композиции.

Результаты исследований показали, что наиболее эффективно применение тонкодисперсного перлита в составе цемента в количестве 3–5%.

При сухом смешивании прочность образцов в первые сутки твердения увеличилась с 23,3 до 34 МПа

Таблица 3
Table 3Строительно-технические свойства цементного теста
Construction and technical properties of cement dough

| Способ введения добавки | Содержание добавки перлита, % | Нормальная густота, % | Схватывание, ч-мин | |
|---|-------------------------------|-----------------------|--------------------|-------|
| | | | Начало | Конец |
| – | – | 25 | 2-20 | 3-20 |
| 0,5% поликарбоксилата | – | 21 | 0-50 | 1-40 |
| Сухая смесь цемента с тонкодисперсным перлитом, затворенная водой | 1 | 25 | 2-30 | 3-30 |
| | 3 | 25 | 2-40 | 3-40 |
| | 5 | 25,5 | 2-55 | 3-50 |
| | 7 | 25,5 | 3-10 | 4-10 |
| | 10 | 26 | 3-20 | 4-20 |
| Сухая смесь цемента с тонкодисперсным перлитом, затворенная водой с поликарбоксилатом | 1 | 20 | 1-00 | 1-50 |
| | 3 | 20,5 | 1-20 | 2-00 |
| | 5 | 21 | 1-30 | 2-10 |
| | 7 | 21,5 | 1-50 | 2-40 |
| | 10 | 22 | 2-20 | 3-10 |
| Затворение водной суспензией тонкодисперсного перлита | 1 | 25 | 2-25 | 3-25 |
| | 3 | 25 | 2-35 | 3-35 |
| | 5 | 25 | 2-45 | 3-45 |
| | 7 | 25,5 | 2-55 | 3-50 |
| | 10 | 25,5 | 3-10 | 4-00 |
| Затворение стабилизированной суспензией тонкодисперсного перлита | 1 | 20 | 0-50 | 1-40 |
| | 3 | 20,5 | 1-00 | 1-50 |
| | 5 | 20,5 | 1-20 | 2-00 |
| | 7 | 21 | 1-40 | 2-20 |
| | 10 | 21 | 1-50 | 2-50 |

(в среднем), соответственно на 46%, степень гидратации увеличилась на 30%; в марочном возрасте прочность образцов увеличилась с 81,5 до 100,4 МПа (в среднем), соответственно на 23%, степень гидратации увеличилась на 14%.

При введении тонкодисперсного перлита в виде водной суспензии вместо воды затворения в состав цемента прочность образцов в первые сутки твердения увеличилась с 23,3 до 38 МПа (в среднем), соответственно на 63%, степень гидратации увеличилась на 35%; в марочном возрасте прочность образцов увеличилась с 81,5 до 105,1 МПа (в среднем), соответственно на 29%, степень гидратации увеличилась на 22%.

При введении пластификатора на поликарбоксилатной основе в бездобавочный портландцемент отмечается увеличение физико-механических и структурных характеристик цементного камня: в первые сутки твердения прочность при сжатии увеличилась с 23,3 до 36,9 МПа, соответственно на 58%, степень гидратации увеличилась на 31%. В марочном возрасте прочность при сжатии увеличилась с 81,5 до

106,9 МПа, соответственно на 31%, степень гидратации увеличилась на 20%.

При затворении цементной смеси, содержащей тонкодисперсный перлит, водой с поликарбоксилатным пластификатором отмечается повышение прочности при сжатии в первые сутки твердения по сравнению с бездобавочным цементом с 23,3 до 44,8 МПа (в среднем), соответственно на 93%, степень гидратации увеличилась на 48%. При сравнении данных образцов с цементными образцами, содержащими только поликарбоксилатный пластификатор, установлено, что прочность образцов с тонкодисперсным перлитом и поликарбоксилатом увеличилась с 36,9 до 44,8 МПа (в среднем), на 21% соответственно, степень гидратации увеличилась на 13%.

В марочном возрасте наблюдается повышение прочности при сжатии с 81,5 до 118,8 МПа (в среднем), соответственно на 46%, степень гидратации увеличилась на 28% по сравнению с бездобавочным цементом. При сравнении данных образцов с цементным образцом, содержащим только поликар-

Таблица 4
Table 4Физико-механические и структурные характеристики цементного камня
Physico-mechanical and structural characteristics of cement stone

| Образец | Прочность при сжатии, МПа, в возрасте | | | | Степень гидратации, %, в возрасте | |
|--|---------------------------------------|-------|-------|--------|-----------------------------------|--------|
| | 1 сут | 3 сут | 7 сут | 28 сут | 1 сут | 28 сут |
| ПЦ (бездобавочный) | 23,3 | 38,5 | 49,5 | 81,5 | 52,8 | 69,2 |
| ПЦ+1% перлита (сухое смешивание) | 27,4 | 44,3 | 61,5 | 95,9 | 66,6 | 74,6 |
| ПЦ+3% перлита (сухое смешивание) | 33,3 | 51,1 | 69,9 | 101,3 | 68,2 | 79,2 |
| ПЦ+5% перлита (сухое смешивание) | 34,7 | 52,2 | 69,4 | 99,5 | 68,8 | 78,5 |
| ПЦ+7% перлита (сухое смешивание) | 33,1 | 50,3 | 67,2 | 96,4 | 67,2 | 77,6 |
| ПЦ+10% перлита (сухое смешивание) | 32,2 | 48,4 | 65,4 | 93,2 | 66 | 76 |
| ПЦ+водная суспензия с содержанием перлита 1% | 34,5 | 47,2 | 65,8 | 102,6 | 67,6 | 78,5 |
| ПЦ+водная суспензия с содержанием перлита 3% | 37,8 | 54,5 | 71,2 | 105,7 | 70,2 | 84 |
| ПЦ+водная суспензия с содержанием перлита 5% | 38,2 | 53,7 | 72,3 | 104,5 | 72,2 | 85,2 |
| ПЦ+водная суспензия с содержанием перлита 7% | 36,8 | 52,8 | 70,7 | 103,4 | 72 | 84,9 |
| ПЦ+водная суспензия с содержанием перлита 10% | 35,1 | 49,7 | 69,4 | 101,3 | 71,7 | 84,3 |
| ПЦ* (бездобавочный) | 36,9 | 68,2 | 78,3 | 106,9 | 69,3 | 83,2 |
| ПЦ*+1% перлита (сухое смешивание) | 43,2 | 75,7 | 83,6 | 113,5 | 75,6 | 86,4 |
| ПЦ*+3% перлита (сухое смешивание) | 44,4 | 77,9 | 89,2 | 118,1 | 78,3 | 88,7 |
| ПЦ*+5% перлита (сухое смешивание) | 45,2 | 80,7 | 91,4 | 119,5 | 78 | 88,1 |
| ПЦ*+7% перлита (сухое смешивание) | 43,6 | 77,2 | 88,6 | 117,3 | 77,2 | 87,4 |
| ПЦ*+10% перлита (сухое смешивание) | 41,7 | 75,5 | 84,4 | 115,3 | 76,1 | 86,5 |
| ПЦ+стабилизированная суспензия с содержанием перлита 1% | 48,2 | 79,4 | 88,6 | 120,5 | 79,9 | 90,3 |
| ПЦ+стабилизированная суспензия с содержанием перлита 3% | 54,4 | 84,4 | 95,6 | 126,6 | 82,5 | 92,2 |
| ПЦ+стабилизированная суспензия с содержанием перлита 5% | 54,2 | 85,5 | 95,9 | 127,5 | 82,7 | 92,5 |
| ПЦ+стабилизированная суспензия с содержанием перлита 7% | 53,8 | 84,1 | 93,4 | 124,4 | 81,8 | 91,7 |
| ПЦ+стабилизированная суспензия с содержанием перлита 10% | 50,2 | 81,1 | 91,4 | 122,7 | 80,6 | 90,8 |

Примечание. *Цементная композиция, содержащая 0,5% пластификатора на поликарбоксилатной основе.

боксилатный пластификатор, установлено, что прочность образцов с тонкодисперсным перлитом и поликарбоксилатом в марочном возрасте увеличилась с 106,9 до 118,8 МПа (в среднем), на 11% соответственно, степень гидратации увеличилась на 6%.

При затворении цемента стабилизированной суспензией перлита отмечается увеличение прочности при сжатии в первые сутки твердения с 23,3 до 54,3 МПа (в среднем), в 2,33 раза; степень гидратации увеличилась на 56% по сравнению с бездобавочным цементом. В марочном возрасте наблюдается увеличение прочности при сжатии с 81,5 до 127,05 МПа (в среднем), на 56% соответственно; степень гидратации увеличилась на 33%.

При сравнении образцов, содержащих стабилизированную суспензию с цементным образцом, содержащим только поликарбоксилатный пластификатор, отмечается увеличение прочности образцов со стабилизированной суспензией перлита в первые сутки твердения с 36,9 до 54,3 МПа (в среднем), на 47% соответственно; степень гидратации увеличилась на

19%. В марочном возрасте прочность образцов со стабилизированной суспензией перлита увеличилась со 106,9 до 127,05 МПа, на 19% соответственно степень гидратации увеличилась на 11% по сравнению с цементным образцом, содержащим только поликарбоксилатный пластификатор.

Из проведенного анализа следует, что наиболее эффективно использовать в составе цемента стабилизированную поликарбоксилатным пластификатором и ультразвуковой обработкой суспензию, содержащую 3–5% перлита. Введение в цементную систему тонкодисперсного перлита в виде стабилизированной суспензии дает более равномерное распределение его частиц в объеме материала, что обеспечивает получение конечного продукта с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Заключение и основные выводы

В ходе исследования агрегативной и седиментационной устойчивости суспензий тонкодисперсного перлита установлено, что максимальная гомогениза-

ция и стабилизация обеспечиваются за счет комплексного воздействия ультразвуковой обработки и введения поликарбоксилатного пластификатора. Наиболее устойчивы суспензии, содержащие 1–3% перлита и 0,3–0,5% поликарбоксилатного пластификатора.

Отмечается, что введение тонкодисперсного перлита в цемент в результате смешивания и последующего затворения водой с поликарбоксилатным пластификатором и введение в цемент стабилизированной суспензии вместо воды затворения обеспечивает увеличение степени гидратации в структуре и физико-механических характеристик цементного камня.

Список литературы

1. Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В., Жерновая Н.Ф. Перлит Мухор-Талы как стекольное сырье // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2012. № 3. С. 32–36.
2. Далакишвили А.И. Процессы стеклообразования в перлит- и обсидиансодержащих шихтах // *Физика и химия стекла*. 2005. Т. 31. № 6. С. 1128–1132.
3. Самхарадзе Н.Я., Чохонелидзе М.И., Мачавариани З.П., Гелашвили Н.В. Перспективы расширения сырьевой базы и увеличения добычи перлитов в Грузии // *Горный журнал*. 2004. № 4. С. 78–80.
4. Микшис Л.П. Перлиты Полярного Урала – сырье для стройиндустрии // *Горные ведомости*. 2006. № 2 (21). С. 64–67.
5. Тотурбиев А.Б., Черкашин В.И., Тотурбиев Б.Д., Тотурбиева У.Д. Перлитовый теплоизоляционный материал на нанодисперсном полисиликат-натриевом вяжущем // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 3. С. 20–24.
6. Балькова Л.И., Сарайкина И.П. Теплоизоляционные материалы на основе камчатских перлитов // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2009. № 9. С. 15–20.
7. Зин Мин Хтет, Тихомирова И.Н. Теплоизоляционный материал на основе вспученного перлита и вспененного минерального связующего // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 107–112. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-107-112>
8. Соловьева Л.Н., Радченко Д.С. Теплоизоляционный бетон на основе отходов производства вспученного перлита // *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2013. № 3. С. 177–181.
9. Рахманова И.А., Саркисов Ю.С., Верещагин В.И. Теплоизоляционные материалы на основе перлита и вермикулита // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 2 (39). С. 257–262.

Однако затворение цемента стабилизированной суспензией является наиболее эффективным способом введения тонкодисперсного перлита в состав цемента, так как обеспечивается наиболее равномерное распределение добавки в объеме цементной системы. Отмечается увеличение прочности при сжатии образцов, затворенных стабилизированной суспензией тонкодисперсного перлита, более чем в два раза в первые сутки твердения и на 56% в марочном возрасте по сравнению с бездобавочным цементом. При сравнении с цементным образцом, содержащим поликарбоксилатный пластификатор, наблюдается увеличение прочности модифицированного образца на 47% в первые сутки твердения и на 19% в марочном возрасте.

References

1. Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V., Zhernovaya N.F. Perlite Mukhor-Tala as a glass raw material. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named V.G. Shukhov*. 2012. No. 3, pp. 32–36. (In Russian).
2. Dalakishvili A.I. Glass formation processes in perlite- and obsidian-containing batches. *Fizika i khimiya stekla*. 2005. Vol. 31. No. 6, pp. 1128–1132. (In Russian).
3. Samkharadze N.Ya., Chokhnelidze M.I., Machavariani Z.P., Gelashvili N.V. Prospects for expanding the resource base and increasing the production of perlite in Georgia. *Gornyy zhurnal*. 2004. No. 4, pp. 78–80. (In Russian).
4. Mikshis L.P. Perlites of the polar Urals - raw materials for the construction industry. *Gornyye vedomosti*. 2006. No. 2 (21), pp. 64–67. (In Russian).
5. Toturbiev A.B., Cherkashin V.I., Toturbiev B.D., Toturbieva U.D. Perlite thermal insulation material based on nanodispersed polysilicate sodium binder. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. No. 3, pp. 20–24. (In Russian).
6. Balykova L.I., Saraykina I.P. Heat-insulating materials based on Kamchatka perlite. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. No. 9, pp. 15–20. (In Russian).
7. Zin Min Htet, Tikhomirova I.N. Heat insulation material on the basis of expanded perlite and expanded mineral binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 107–112. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-107-112>
8. Solovieva L.N., Radchenko D.S. Heat-insulating concrete based on expanded perlite production waste. *Resource-Energy-Efficient Technologies in the Regional Construction Complex*. 2013. No. 3, pp. 177–181. (In Russian).
9. Rakhmanova I.A., Sarkisov Yu.S., Vereshchagin V.I. Thermal insulation materials based on perlite and vermiculite. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013. No. 2 (39), pp. 257–262. (In Russian).

10. Высоцкая М.А., Фёдоров М.Ю., Кузнецов Д.А. Адсорбционная и структурирующая активность перлита как наполнителя для асфальтобетона // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2012. № 7–8 (643–644). С. 21–26.
11. Шулаев М.В., Баширов Р.Р., Емельянов В.М. Исследование адсорбционных свойств промышленного отхода – отработанного перлита // *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*. 2010. Т. 53. № 3. С. 59–62.
12. Варданыан М.А. Гидрофобизация вспученного перлита синтетическими полимерными материалами и изучение его сорбционных свойств // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. № 2 (70). С. 50–59.
13. Казым У. Адсорбирующее свойство перлита // *Знание*. 2016. № 3–5 (32). С. 95–98.
14. Тихонов Ю.М., Терехин С.Н., Аубакирова И.У., Шидловский Г.Л., Гугучкина М.Ю. Поведение огнезащитных материалов на основе вермикулита, перлита и минеральной фибры в условиях пожара: Монография. СПб., 2016. 148 с.
15. Терехин С.Н., Шидловский Г.Л., Тихонов Ю.М. Огнезащитные композиты на основе вермикулита, перлита и волокнистых наполнителей // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2015. № 3 (35). С. 41–44.
16. Фадеева Н.П., Павлов М.В., Харченко И.А., Симунин М.М., Шабанова К.А., Павлов В.Ф., Рыжков И.И. Высокопрочные керамические подложки на основе перлита и пеносиликатов для фильтрационных мембран // *Мембраны и мембранные технологии*. 2022. Т. 12. № 3. С. 192–199.
17. Гургенян Н.В., Пюсюклян К., Хачанова И.Б. Радиационные характеристики перлитов // *Химическая технология*. 2015. Т. 16. № 6. С. 352–357.
18. Куликова Е.С., Кривун Е.А. Бетоны на вспученных перлитах // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. 2017. № 1. С. 291–293.
19. Волкова О.Е., Волкова А.Ю. Строительные материалы на основе вспученного перлита и магнезального вяжущего // *Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки*. 2015. Т. 1. С. 201–203.
20. Наседкин В.В. Перлит как заполнитель легких бетонов (историческая хроника и перспективы на будущее) // *Строительные материалы*. 2006. № 6. С. 70–74.
21. Нациевский С.Ю., Алексеева Л.В. Производство сухих строительных смесей с применением вспученного перлита // *Сухие строительные смеси*. 2012. № 6. С. 26–27.
22. Черняк Л.П., Дорогань Н.А., Глушченко Д.К. Применение перлита как компонента сырьевой смеси для изготовления цементного клинкера // *Colloquium-Journal*. 2018. № 6–1 (17). С. 57–62.
10. Vysotskaya M.A., Fedorov M.Yu., Kuznetsov D.A. Adsorption and structuring activity of perlite as a filler for asphalt concrete. *Izvestia of higher educational institutions. Construction*. 2012. No. 7–8 (643–644), pp. 21–26. (In Russian).
11. Shulaev M.V., Bashirov R.R., Emelyanov V.M. Investigation of the adsorption properties of industrial waste – spent perlite. *Izvestiya of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. 2010. Vol. 53. No. 3, pp. 59–62. (In Russian).
12. Vardanyan M.A. Hydrophobization of expanded perlite with synthetic polymeric materials and study of its sorption properties. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2017. No. 2 (70), pp. 50–59. (In Russian).
13. Kazym U. Adsorbing property of perlite. *Znaniye*. 2016. No. 3–5 (32), pp. 95–98. (In Russian).
14. Tikhonov Yu.M., Terekhin S.N., Aubakirova I.U., Shidlovskiy G.L., Guguchkina M.Yu. Povedeniye ognезashchitnykh materialov na osnove vermikulita, perlita i mineral'noy fibry v usloviyakh pozhara: Monografiya [Behavior of fire-retardant materials based on vermiculite, perlite and mineral fiber under fire conditions: Monograph]. Sankt-Peterburg. 2016. 148 p.
15. Terekhin S.N., Shidlovsky G.L., Tikhonov Yu.M. Fire-retardant composites based on vermiculite, perlite and fibrous fillers. *Problems of risk management in the technosphere*. 2015. No. 3 (35), pp. 41–44. (In Russian).
16. Fadeeva N.P., Pavlov M.V., Kharchenko I.A., Simunin M.M., Shabanova K.A., Pavlov V.F., Ryzhkov I.I. High-strength ceramic substrates based on perlite and silicate foams for filtration membranes. *Membrany i membranenye tekhnologii*. 2022. Vol. 12. No. 3, pp. 192–199. (In Russian).
17. Gurgenyanyan N.V., Pyuskylyan K., Khachanova I.B. Radiation characteristics of perlite *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2015. Vol. 16. No. 6, pp. 352–357. (In Russian).
18. Kulikova E.S., Krivun E.A. Concrete on expanded perlite. *Dal'niy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2017. No. 1, pp. 291–293. (In Russian).
19. Volkova O.E., Volkova A.Yu. Building materials based on expanded perlite and magnesia binder. *Trudi of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences*. 2015. Vol. 1, pp. 201–203. (In Russian).
20. Nasedkin V.V. Perlite as a filler for lightweight concrete (historical chronicle and prospects for the future). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 6, pp. 70–74. (In Russian).
21. Natsievskii S.Yu., Alekseeva L.V. Production of dry building mixes using expanded perlite. *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. 2012. No. 6, pp. 26–27. (In Russian).
22. Chernyak L.P., Dorogan N.A., Glushchenko D.K. The use of perlite as a component of the raw mix for the manufacture of cement clinker. *Colloquium-Journal*. 2018. No. 6–1 (17), pp. 57–62. (In Russian).

23. Хардаев П.К. Повышение эффективности использования закристаллизованных перлитов в технологии бетонов: Дис. ... д-ра техн. наук. Улан-Удэ, 2000. 470 с.
24. Бережной Ю.М., Романова О.Н., Бессарабов Е.Н., Севостьянова А.А. Перспективы использования вспененного модифицированного перлита для получения новых композиционных материалов // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1 (48). С. 133.
25. Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В. Комплексная оценка факторов повышения прочности цементного камня добавками ультрадисперсного перлита // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2009. № 2. С. 55–60.
26. Павленко Н.В., Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В., Суворова А.Р. Перлит как эффективное сырье при получении наноструктурированного вяжущего негидратационного типа твердения // *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2012. № 2. С. 240–243.
27. Лесовик В.С., Жерновой Ф.Е., Глаголев Е.С. Использование природного перлита в составе смешанных цементов // *Строительные материалы*. 2009. № 6. С. 84–87.
28. Чижов Р.В., Кожухова Н.И., Жерновский И.В., Коротких Д.Н., Фомина Е.В., Кожухова М.И. Фазообразование и свойства алюмосиликатных вяжущих негидратационного типа твердения с использованием перлита // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 34–36.
29. Кожухова Н.И., Чижов Р.В., Жерновский И.В., Логанина В.И., Строкова В.В. Особенности структурообразования геополимерной вяжущей системы на основе перлита с использованием различных видов щелочного активатора // *Строительные материалы*. 2016. № 3. С. 61–64.
30. Кожухова Н.И., Фомина Е.В., Жерновский И.В. Особенности формирования структуры и свойства алюмосиликатных вяжущих на основе перлита // *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2015. № 5. С. 100–104.
31. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Potaev D., Tsakhilova D. Efficiency of stabilization of slag suspensions by polycarboxylate. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. 02039. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102039
32. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Nikiporova T., Kosarev S. Method of modifying Portland slag cement with ultrafine component. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. 983, pp. 807–816. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_79
33. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Zamelin D., Pepelyaeva A. Complex method of stabilizing slag suspension. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983, pp. 817–827. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_80
23. Khardaev P.K. Improving the efficiency of using crystallized perlites in concrete technology. Dis... Doctor of Sciences (Engineering). Ulan-Ude, 2000. 470 p. (In Russian).
24. Berezhnoy Yu.M., Romanova O.N., Bessarabov E.N., Sevostyanova A.A. Prospects for the use of foamed modified perlite to obtain new composite materials. *Inzhenerny Vestnik Dona*. 2018. No. 1 (48), p. 133.
25. Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V. Comprehensive assessment of the factors of increasing the strength of cement stone with the addition of ultrafine perlite. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2009. No. 2, pp. 55–60. (In Russian).
26. Pavlenko N.V., Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V., Suvorova A.R. Perlite as an effective raw material for obtaining a nanostructured binder of non-hydration type of hardening. *Resursoenergoeffektivnyye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2012. No. 2, pp. 240–243. (In Russian).
27. Lesovik V.S., Zhernovoi F.E., Glagolev E.S. The use of natural perlite in the composition of mixed cements. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 6, pp. 84–87. (In Russian).
28. Chizhov R.V., Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Korotkikh D.N., Fomina E.V., Kozhukhova M.I. Phase formation and properties of aluminosilicate binders of non-hydration hardening type using perlite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 3, pp. 34–36. (In Russian).
29. Kozhukhova N.I., Chizhov R.V., Zhernovsky I.V., Loganina V.I., Strokhova V.V. Peculiarities of structure formation of a geopolymer binder system based on perlite using various types of alkaline activator. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 3, pp. 61–64. (In Russian).
30. Kozhukhova N.I., Fomina E.V., Zhernovsky I.V. Peculiarities of structure formation and properties of aluminosilicate binders based on perlite. *Resursoenergoeffektivnyye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2015. No. 5, pp. 100–104. (In Russian).
31. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Potaev D., Tsakhilova D. Efficiency of stabilization of slag suspensions by polycarboxylate. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. 02039. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102039
32. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Nikiporova T., Kosarev S. Method of modifying Portland slag cement with ultrafine component. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. 983, pp. 807–816. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_79
33. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Zamelin D., Pepelyaeva A. Complex method of stabilizing slag suspension. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983, pp. 817–827. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_80

А.Ф. ГОРДИНА, канд. техн. наук (gism56@mail.ru),
И.С. ПОЛЯНСКИХ, канд. техн. наук (irina_maeva@mail.ru),
А.Т. ГАФИПОВ, магистрант (a.gafipov@mail.ru),
Н.В. КУЗЬМИНА, магистр (аспирант) (oosila22a@mail.ru),
И.А. ПУДОВ, канд. техн. наук (PudovIA@yandex.ru)

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова (426000, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

Особенности формирования структуры и свойств фторангидритовых материалов

Процессы гидратации и твердения ангидритовых вяжущих характеризуются низкой скоростью, что приводит к пониженным значениям физико-механических свойств материалов, изготавливаемых на их основе. Для ускорения и интенсификации процессов структурообразования сульфатсодержащих вяжущих, как правило, используют активаторы твердения различной природы. В работе приведены результаты исследования совместного влияния активаторов твердения различной природы – сульфата натрия, портландцемента, фосфата натрия и техногенной добавки на ангидритовое вяжущее. В качестве техногенной добавки предложено использование металлургической пыли. Определена оптимальная концентрация добавок (3% активатора и 0,5–1,5% металлургической пыли), при которой наблюдаются положительные изменения физико-технических показателей разработанного материала, включая рост предела прочности при изгибе и сжатии, снижение водопоглощения и изменение коэффициента размягчения вследствие изменения условий гидратации. Особенности гидратации и твердения модифицированных составов подтверждены исследованиями микроструктуры материалов и спектрами ДТ и ТГ анализов. Микроструктурный анализ фторангидритовой матрицы показал, что введение добавок приводит к уплотнению структуры, снижению пористости и увеличению площади контактной поверхности между кристаллогидратами. Результаты спектральных исследований свидетельствуют, что введение фосфата натрия способствует формированию благоприятных условий для гидратации вяжущего.

Ключевые слова: фторангидритовые вяжущие, активаторы твердения, комплексные добавки, техногенные материалы, физико-технические свойства, водостойкость.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-3391.2022.4).

Для цитирования: Гордина А.Ф., Полянских И.С., Гафипов А.Т., Кузьмина Н.В., Пудов И.А. Особенности формирования структуры и свойств фторангидритовых материалов // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 50–57.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-50-57>

A.F. GORDINA, Candidate of Science (Engineering) (gism56@mail.ru), I.S. POLYANSKIKH, Candidate of Science (Engineering) (irina_maeva@mail.ru), A.T. GAFIPOV, Master student (oosila22a@mail.ru), N.V. KUZMINA, graduate student (oosila22a@mail.ru), I.A. PUDOV, Candidate of Science (Engineering) (PudovIA@yandex.ru)
Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426000, Russian Federation)

Structure Formation Aspects for Fluorhydrate-Based Materials

It is known that moderate physical-mechanical properties of anhydrate-based materials are due to the slow hydration reaction and hardening. To make it faster and manage structure formation of sulfate-based materials different types of hardening activators are widely used. In this article there are results of using activators of different nature and their impact on anhydrate-based binder, activators that were used – sodium sulfate, Portland cement, sodium phosphate and a by-product additive. Metallurgical dust was suggested to use in this research as a by-product additive. It was proved that effective amount of additives is 3% of activator of hardening combining with 0.5–1.5% of metallurgical dust. This amount of additives has led to positive changes in characteristics of material such as increasing of strength (flexural and compressive) and water resistance, reducing of water absorption. All that changes is likely due to changes in hydration conditions. Aspects of hydration process have been explained by microstructure and differential thermal analyses. Microstructure of fluor anhydrate-based material showed that using the additives results in formation of denser structure. Also, additives enable the porosity to decrease and at the same time the contact areas between new growths increase. Spectral results showed that sodium phosphate is the most effective in terms of providing proper conditions for binder hydration.

Keywords: fluorhydrate-based binders, activator of hardening, complex additives, by-product materials, physical-mechanical properties, water resistance.

Research was supported by the Grant of Russian President (grant МК-3391.2022.4).

For citation: Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Gafipov A.T., Kuzmina N.V., Pudov I.A. Structure formation aspects for fluorhydrate-based materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 50–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-50-57>

Материалы на основе ангидрита относят к экологичным и малоэнергоёмким. При этом основные физико-технические параметры вяжущих на основе сульфата кальция сопоставимы с характеристиками изделий, изготавливаемых на основе портландце-

мента. К данной группе вяжущих наряду с природными ангидритами относят широкий спектр техногенных продуктов, включая фосфогипс, фторангидрит, синтетический ангидрит. Преимущественно, материалы на основе безводного сульфата кальция,

применяют для устройства самонивелирующихся стяжек [1], для изготовления штукатурных и кладочных растворов [2, 3], в качестве основания для дорожного полотна [4], для получения пазогребневых плит [5] и т. д.

Известно, что нерастворимый ангидрит, превалирующий в составе ангидритовых вяжущих, в нормальных условиях практически не переходит в дигидрат сульфата кальция при взаимодействии с водой. Процессы гидратации и твердения ангидритовых вяжущих характеризуются низкой скоростью и приводят к ограниченным значениям физико-механических свойств. Для ускорения и интенсификации процессов структурообразования сульфатсодержащих вяжущих используют активаторы твердения [6, 7]. Механизм влияния активаторов зависит от состава вводимых соединений и главным образом характеризуется ускорением растворения сульфата кальция или формированием комплексных соединений, способствующих регулированию процесса зарождения новообразований [5, 8–10].

В работе [5] установлено, что совместное введение хлорида натрия и сульфата калия, содержание которых не превышает 3% от массы вяжущего, позволяет регулировать сроки схватывания, механические параметры изделия и позволяет изготавливать пазогребневые изделия, отвечающие требованиям ГОСТа.

Исследователями [10, 11] показана возможность интенсификации процессов структурообразования ангидритовых вяжущих введением двойных сульфатных солей, механизм действия которых связан с замедлением процесса гидролиза сульфата кальция. Отмечен кольматирующий эффект подобных добавок, обусловленный формированием малорастворимых соединений – сингениита, коктаита, глауберита или гидроглауберита. Комплексная активация позволяет не только улучшить механические свойства, но и способствует значительному росту водостойкости материала. Оптимальный диапазон концентрации подобных добавок варьируется от 1 до 5%.

Авторами работ [12, 13] отмечено, что введение сульфатных солей в количестве 2–3%, включая сульфит натрия, приводит к интенсификации процессов гидратации и к раннему набору прочности, в то время как введение сульфата натрия позволяет направленно влиять на структурообразование на более поздних этапах, способствуя получению однородной и прочной матрицы с более совершенными кристаллогидратами гипса.

Добавление щелочного агента – гидроксида кальция (обожженного гипсового камня) в количестве до 7% обеспечивает рост механических свойств, но ускорения твердения не наблюдается; на ранних этапах набора прочности значение предела прочности ниже по сравнению с сульфатной активацией [14].

Введение оптимального активатора способствует интенсификации процессов гидратации и твердения

ангидрита, приводя к росту механических параметров матрицы; при этом основным недостатком, ограничивающим применение воздушных вяжущих, такой как низкая водостойкость, остается неизменным. Одним из способов повышения данной характеристики является использование минеральных добавок совместно с активатором твердения. Совместное введение добавок создает благоприятные условия для формирования в структуре матрицы малорастворимых новообразований, которые заполняют поровое пространство и затрудняют процесс вымывания сульфатных кристаллогидратов.

Установлено, что использование в качестве таких добавок техногенных минеральных продуктов обеспечивает улучшение прочностных характеристик и водостойкости композиционных материалов за счет формирования матрицы повышенной плотности с покрытием кристаллов двуводного сульфата кальция нерастворимыми в воде соединениями. Подобный эффект наблюдается при совместном введении микрокремнезема, извести и пластификатора [15]; при введении 1–5% алюмохромового катализатора совместно с сульфатным активатором (гидросульфитом натрия) [16]; при совместном введении 15–25% феррохромового шлака с негашеной известью [17]; при добавлении 5–15% железного сурика или обожженного отхода очистки кислых шахтных вод, которые наряду с окисью металла содержат свободную известь [18]. Таким образом, оптимизация комплексных добавок и расширение возможных комбинаций модификаторов, используемых для повышения физико-технических характеристик ангидритовых вяжущих, является достаточно актуальным направлением.

Работа направлена на исследование влияния активаторов твердения различного действия совместно с техногенной добавкой – металлургической пылью – на структуру и свойства фторангидрита. Проведенный анализ исследований в области ускорения процессов гидратации вяжущего на основе ангидрита позволил выбрать материалы, способствующие сульфатной или щелочной активации структурообразования.

В качестве вяжущего был использован фторангидрит – отход производства плакированной кислоты компании АО «ГалоПолимер», г. Пермь, соответствующий ТУ 5744-132-05807960–98. Техногенный продукт предварительно подвергался дроблению и измельчению. В работе использовался материал, характеризующийся остатком на сите № 0,315 не более 10%.

В качестве активаторов твердения применялись сульфат натрия, портландцемент ЦЕМ I 32,5Н компании ООО ТД «Корунд» и фосфат натрия. Концентрация активаторов твердения была выбрана на основе анализа литературных данных и ранее проведенных исследований, принята постоянной и равнялась 3%, соли растворялись в воде затворения для получения соответствующего раствора.

Таблица 1
Table 1

Физико-технические характеристики ангидритовых композиций
Physico-technical characteristics of anhydrite compositions

| Вид активатора | Количество активатора, % | Содержание МП, % | В/Г отношение | Средняя плотность, кг/м ³ | Предел прочности в возрасте 28 сут, МПа | | Водопоглощение, % | Коэффициент размягчения |
|----------------|--------------------------|------------------|---------------|--------------------------------------|---|------------|-------------------|-------------------------|
| | | | | | при изгибе | при сжатии | | |
| – | 0 | 0 | 0,25 | 1850 | 3,5 | 20 | 10,4 | 0,51 |
| ЦЕМ I | 3 | 0 | 0,22 | 1880 | 4,4 | 20,5 | 11,7 | 0,59 |
| | | 1,5 | 0,22 | 1900 | 4,7 | 22,9 | 11,4 | 0,76 |
| Сульфат натрия | 3 | 0 | 0,22 | 1900 | 7,4 | 23,6 | 9,5 | 0,75 |
| | | 0,5 | 0,22 | 1910 | 7,6 | 24,9 | 9,6 | 0,71 |
| Фосфат натрия | 3 | 0 | 0,22 | 1920 | 8,7 | 29,4 | 7,2 | 0,86 |
| | | 1,5 | 0,22 | 1930 | 8,8 | 33,7 | 7,1 | 0,79 |

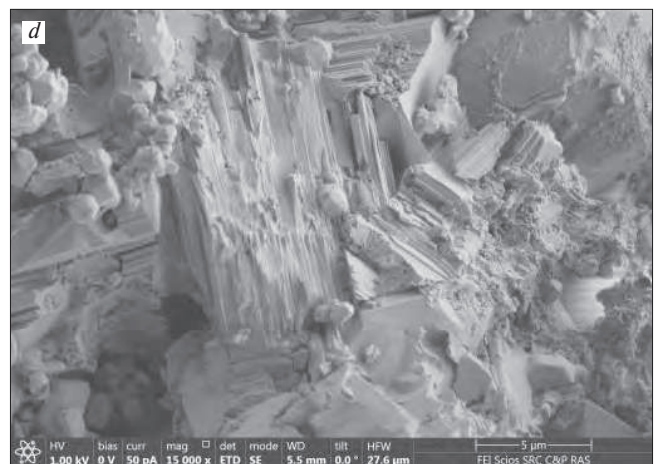
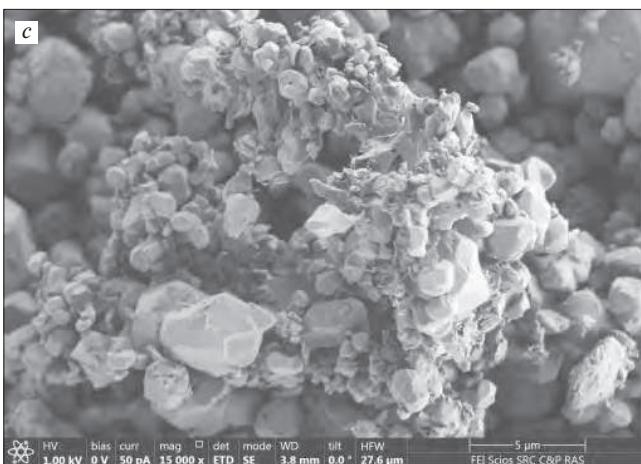
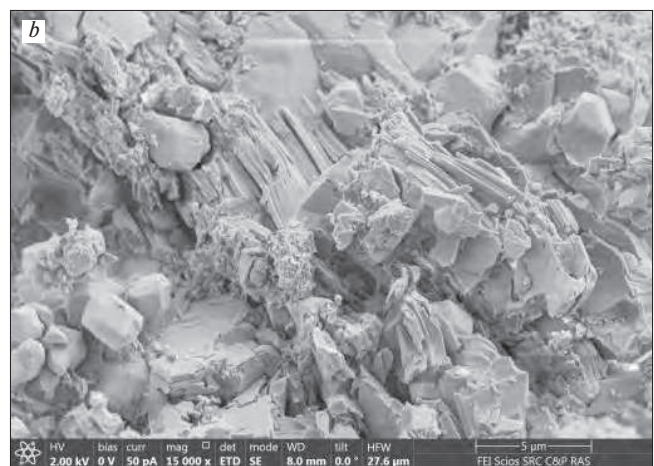
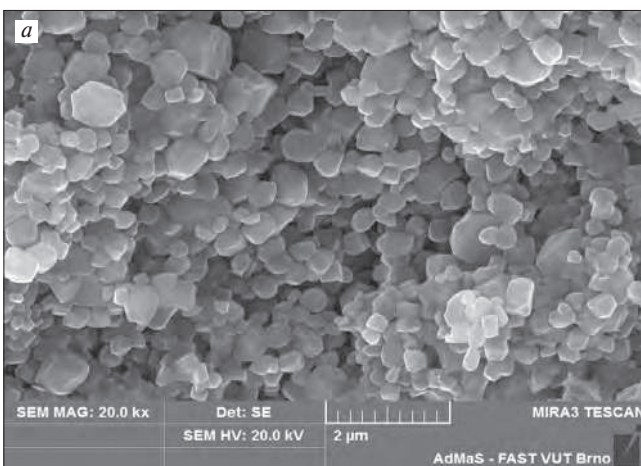


Рис. 1. Микроструктура фторангидрита: *a* – затворенного водой [20]; *b* – при введении 3% водного раствора фосфата натрия; *c* – при введении 3% портландцемента; *d* – при введении 3% раствора сульфата натрия

Fig. 1. Microstructure of fluoroanhydrite: *a* – mixed with water [20]; *b* – with the introduction of a 3% aqueous solution of sodium phosphate; *c* – with the introduction of 3% Portland cement; *d* – with the introduction of a 3% solution of sodium sulfate

В качестве техногенной добавки использовалась металлургическая пыль – отход производства стали, который скапливается на циклонах на предприятии ОАО «Ижсталь», г. Ижевск. Анализ химического состава металлургической пыли был проведен на рентгеновском флуоресцентном спектрометре с волновой дисперсией «Axios mAX» (фирма PANalytical).

В состав добавки входят следующие оксиды: оксид железа (III) (Fe₂O₃) – 54%; оксид магния (MgO) – 14%; оксид кальция (CaO) – 12%; оксид кремния (SiO₂) – 6%. В качестве примесей (1–2%) содержатся оксиды хрома (III), алюминия, марганца и цинка. Однако в процессе хранения часть оксидов металлов переходит в соответствующие гидроксиды,

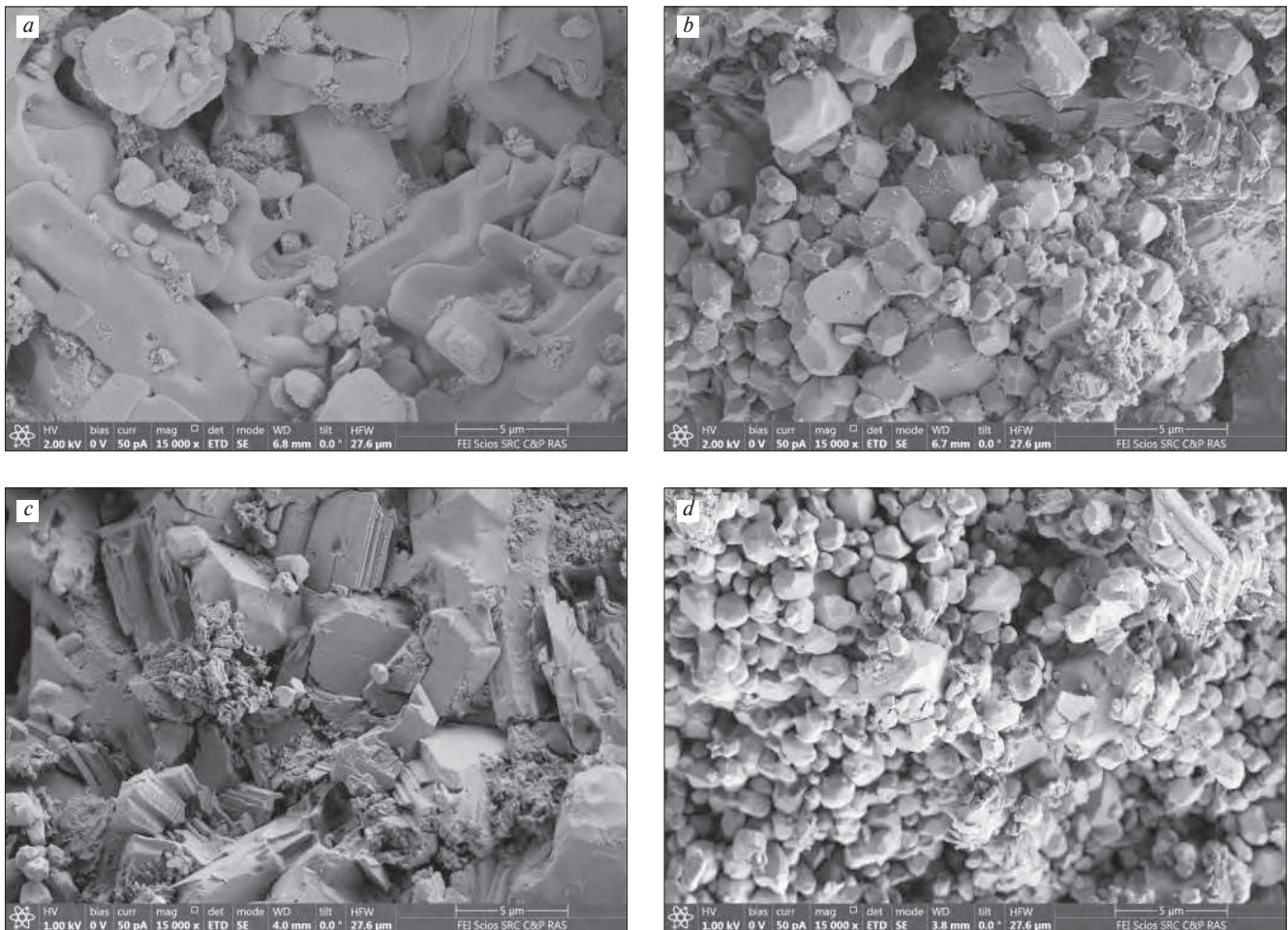


Рис. 2. Микроструктура фторангидритовой композиции: *a, b* – при введении 3% водного раствора фосфата натрия и 1,5% металлургической пыли; *c* – при введении 3% раствора сульфата натрия и 0,5% металлургической пыли; *d* – при введении 3% портландцемента и 1,5% металлургической пыли

Fig. 2. Microstructure of the fluoroanhydrite composition: *a, b* – with the introduction of 3% aqueous sodium phosphate solution and 1.5% metallurgical dust; *c* – with the introduction of 3% sodium sulfate solution and 0.5% metallurgical dust; *d* – with the introduction of 3% Portland cement and 1.5% metallurgical dust

формируется аморфная фаза. Дисперсионный анализ добавки показал, что средний размер частиц составляет 50–80 мкм, однако более 50% частиц порошка находится в диапазоне с размером частиц менее 35 мкм.

Исследование физико-механических свойств, включая прочностные характеристики и параметры водостойкости, проведено в соответствии с ГОСТ 23789–79 и ГОСТ 23789–2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний». Для определения свойств изготавливались образцы–балочки размерами 160×40×40 мм, которые до испытания хранились при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 28 сут.

Исследование микроструктуры композита выполнялось на автоэмиссионном растровом электронно ионном (FIB) микроскопе Scios FEI. Дифференциально-термический и термогравиметрический анализ проведен с помощью дифференциально-сканирующего калориметра TGA/DSC1 компании MettlerToledo в диапазоне температуры 60–1100°C со скоростью нагрева 30°C/мин.

Исследование комплексного влияния активатора и металлургической пыли на свойства фторангидри-

та позволило установить положительное влияние комплекса модификаторов на физико-технические характеристики материала в табл. 1.

Совместное введение активатора твердения и металлургической пыли способствует росту механических характеристик фторангидритовых композиций: наибольший прирост прочностных свойств наблюдается при использовании фосфата натрия, обеспечивая значение предела прочности в возрасте 28 сут на растяжение при изгибе, равное 8,5 МПа, и при сжатии – 33,7 МПа. Введение металлургической пыли способствует росту плотности композита, снижению водопоглощения, но при этом наблюдается незначительное снижение коэффициента размягчения в сравнении с составами при введении соответствующего активатора твердения. Вероятно, частицы техногенной минеральной добавки выступают в качестве дополнительных центров структурообразования вяжущего, а также вступают во взаимодействие со щелочным компонентом фторангидритового вяжущего (СаО), приводя к образованию малорастворимых соединений. При этом минеральная добавка способствует более пол-

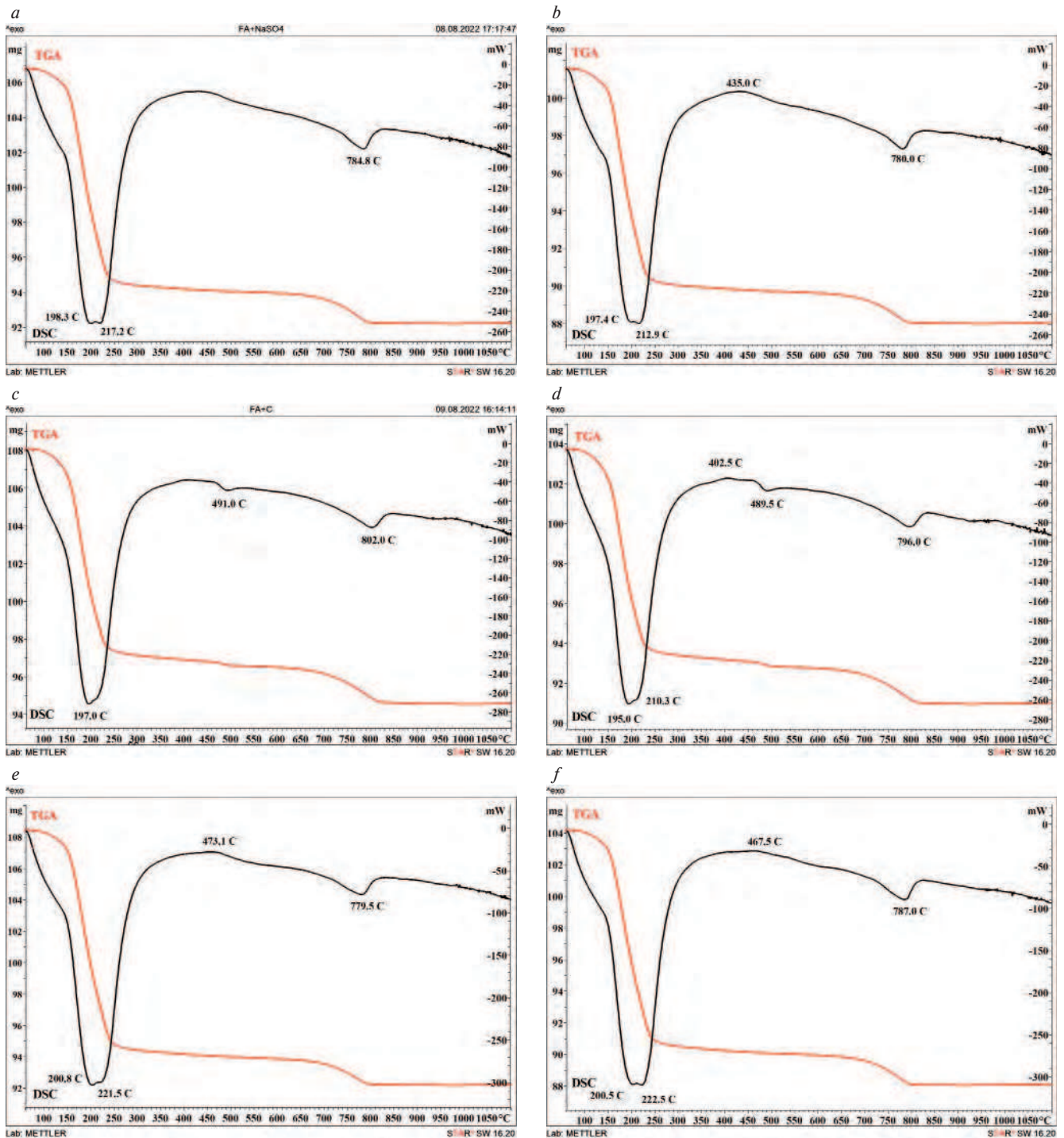


Рис. 3. Спектральный анализ фторангидритовых композиций при введении следующих добавок: *a* – 3% раствор сульфата натрия; *b* – 3% раствор сульфата натрия и 0,5% металлургической пыли; *c* – 3% портландцемента; *d* – 3% портландцемента и 1,5% металлургической пыли; *e* – 3% раствор фосфата натрия; *f* – 3% раствор фосфата натрия и 1,5% металлургической пыли

Fig. 3. Spectral analysis of fluoroanhydrite compositions with the introduction of the following additives: *a* – 3% sodium sulfate solution; *b* – 3% sodium sulfate solution and 0.5% metallurgical dust; *c* – 3% Portland cement; *d* – 3% Portland cement and 1.5% metallurgical dust; *e* – 3% sodium phosphate solution; *f* – 3% sodium phosphate solution and 1.5% metallurgical dust

ному переходу нерастворимого ангидрита в двугидрат сульфата кальция, который вымывается при воздействии влаги.

При гидратации фторангидридного вяжущего без введения активатора твердения в составе материала превалирует промежуточное соединение $\text{CaSO}_4 \cdot 0,62\text{H}_2\text{O}$, которое постепенно перекристаллизуется в двугидрат сульфата кальция [19]. Структура

представлена кристаллами таблитчатой и кубовидной формы, размер которых варьируется от 0,2 до 1 мкм. Это свидетельствует о том, что матрица сложена из кристаллов ангидрита, гидратация прошла в небольшом объеме.

Введение активаторов твердения интенсифицирует процессы структурообразования вяжущего: введение солей натрия способствует более полному пе-

Таблица 2
Table 2Результаты ТГ анализа фторангидритовых составов
Results of TG analysis of fluoroanhydrite compositions

| № п/п | Вид активатора | Количество активатора, % | Содержание МП, % | Реакция | Температура (пик), °С | Δm_i , % |
|-------|----------------|--------------------------|------------------|--|-----------------------|------------------|
| 1 | ЦЕМ I | 3 | 0 | Дегидратация гипса | 198,3 / 217,2 | 11,8 |
| 2 | | | 1,5 | | 197,4 / 212,9 | 11,5 |
| 3 | Сульфат натрия | 3 | 0 | | 197 | 10,3 |
| 4 | | | 0,5 | | 195 / 210,3 | 10,2 |
| 5 | Фосфат натрия | 3 | 0 | | 200,8 / 221,5 | 13,2 |
| 6 | | | 1,5 | | 200,5 / 222,5 | 13,4 |
| 7 | ЦЕМ I | 3 | 0 | Частичное разрушение CaSO_4 Разрушение CaCO_3 | 784,8 | 1,9 |
| 8 | | | 1,5 | | 780 | 1,8 |
| 9 | Сульфат натрия | 3 | 0 | | 784,8 | 1,8 |
| 10 | | | 0,5 | | 780 | 1,9 |
| 11 | Фосфат натрия | 3 | 0 | | 779,5 | 1,7 |
| 12 | | | 1,5 | | 787 | 2 |

реходу безводного сульфата натрия в двуводный и ускорению процессов гидратации.

При добавлении активаторов твердения наблюдается формирование крупных конгломератов и уплотнение структуры матрицы. Однако формирование кристаллов двуводрата сульфата кальция наблюдается в незначительном объеме.

Добавление в состав композиции металлургической пыли, выступающей в роли затравки в процессах структурообразования, обеспечивает дополнительное увеличение физико-механических характеристик в табл. 1. Для установления механизма влияния были проведены исследования микроструктуры (рис. 2) оптимальных составов и проанализированы спектральные данные полученные методами ДТА и ТГ.

Комплексное введение металлургической пыли и активаторов твердения приводит к изменению условий формирования матрицы на основе сульфата кальция. Совместное введение добавок приводит к уплотнению структуры, снижению пористости и увеличению площади контактной поверхности кристаллогидратов. При этом можно отметить, что при добавлении солей натрия наряду с кубовидными кристаллами ангидрита формируются призматические и слоистые кристаллогидраты гипса. При активации твердения раствором фосфата натрия также наблюдается образование аморфизированных соединений, которые дополнительно связывают и уплотняют структуру материалов.

Для определения характера взаимодействия между фторангидритовым вяжущим, активатором твердения и техногенной добавкой был проведен анализ ДТА и ТГ-спектров композитов (рис. 3).

Спектральный анализ позволил установить основные термические эффекты:

– в интервале температуры от 100 до 300°C присутствует характерный для гипса двойной эндотермический эффект, соответствующий удалению свободной и химически связанной воды;

– экзотермический эффект, соответствующий диапазону температуры 350–500°C, связан с перестройкой кристаллической решетки сульфата кальция;

– эндотермический пик в интервале температуры от 700 до 800°C соответствует частичному разложению сульфата кальция и диссоциации карбоната кальция, присутствующего в составе вяжущего.

При введении в состав фторангидрита портландцемента также можно отметить наличие эндотермического эффекта при температуре 490°C, обусловленного диссоциацией гидроксида кальция.

С целью анализа изменения в составе продуктов гидратации были установлены потери массы образцов при соответствующей температуре (табл. 2).

Анализ результатов спектральных данных для составов с активаторами твердения без минерального компонента и при совместном введении активаторов и металлургической пыли показал, что при добавлении фосфата натрия формируются наиболее благоприятные условия для гидратации вяжущего.

Выводы

Проведенные исследования комплексного влияния активаторов твердения совместно с металлургической пылью на структуру и свойства фторангидритового вяжущего позволили установить, что введение добавок улучшает условия структурообразования матрицы. При оптимальной концентрации добавок (3% активатора и 0,5–1,5% металлургической пыли) наблюдается рост физико-технических показателей

композиционного материала, включая механические характеристики, снижение водопоглощения и изменение коэффициента размягчения. Комплексное введение добавок способствует не только более пол-

ному переходу нерастворимого сульфата кальция в двуводную модификацию, но и способствует уплотнению структуры композита, что и обеспечивает улучшение свойств материала.

Список литературы

1. Манкеевич Я.В., Сычева Л.И. Влияние механоактивации фосфогипсовой сырьевой смеси на гидратацию и твердение ангидритового вяжущего // *Успехи в химии и химической технологии*. 2014. № 8 (157). С. 61–64.
2. Nizevičienė D., Vaičiukynienė D., Vaitkevičius V., Rudžionis B. Effects of waste fluid catalytic cracking on the properties of semi-hydrate phosphogypsum // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 137, pp. 150–156. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.037
3. Фоменко А.И., Грызлов В.С., Федорчук Н.М., Каптюшина А.Г. Сухая строительная смесь на основе фосфополугидрата сульфата кальция // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 60–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-60-63>
4. Gumeniuk A., Polyanskikh I., Gordina A. et al. Fluoroanhydrite based composites with the thermoplastic additive // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 4 (112). 11210. DOI: 10.34910/MCE.112.10
5. Бондаренко С.А., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., Крамар Л.Я. Использование фторангидрита в производстве пазогребневых перегородок // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 68–69.
6. Курмангалиева А.И., Аниканова Л.А., Волкова О.В. и др. Активация процессов твердения фторангидритовых композиций химическими добавками солей натрия // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2020. Т. 63. № 8. С. 73–80. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6137
7. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б., Гальцева Н.А. и др. Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 4–9. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9
8. Белов В.В., Бурьянов А.Ф., Яковлев Г.И. и др. Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция: Монография / Под общ. ред. Бурьянова А.Ф. М.: Де Нова, 2012. 195 с.
9. Buryanov A.F., Petropavlovskii K.S., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B. Formation of the spatial structure of a condensed system of calcium sulphate dihydrate // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1425. Modelling and Methods of Structural Analysis. 13–15 November 2019. Moscow, Russian Federation. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012194
10. Клименко В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ в технологии получения ангидритовых вяжущих // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 12. С. 119–125. DOI: 10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605.

References

1. Mankeevich Y.V., Sycheva L.I. Influence of mechanical activation of phosphogypsum raw mix on hydration and hardening of anhydrite binder. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2014. No. 8(157), pp. 61–64. (In Russian).
2. Nizevičienė D., Vaičiukynienė D., Vaitkevičius V., Rudžionis B. Effects of waste fluid catalytic cracking on the properties of semi-hydrate phosphogypsum // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 137, pp. 150–156. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.037
3. Fomenko A.I., Gryzlov V.S., Fedorchuk N.M., Kaptyushina A.G. Dry building mix on the basis of phospho-hemihydrate of calcium sulfate. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 60–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-60-63>
4. Gumeniuk A., Polyanskikh I., Gordina A. et al. Fluoroanhydrite based composites with the thermoplastic additive. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 4 (112). 11210. DOI: 10.34910/MCE.112.10
5. Bondarenko S.A., Trofimov B.Ya., Chernykh T.N., Kramar L.Ya. The use of fluoroanhydrite in the production of tongue-and-groove partitions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3. pp. 68–69. (In Russian).
6. Kurmangaliev A.I., Anikanova L.A., Volkova O.V. et al. Activation of hardening processes of fluorogypsum compositions by chemical additives of sodium salts. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2020. Vol. 63, pp. 73–80. (In Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6137
7. Buryanov A.F., Fisher H.-B., Gal'tseva N.A., Machortov D.N., Hasanshin R.R. Research in the influence of various activating additives on the properties of anhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>
8. Belov V.V., Buryanov A.F., Yakovlev G.I. et al. Modifikatsiya struktury i svoystv stroitel'nykh kompozitov na osnove sul'fata kal'tsiya: monografiya [Modification of the structure and properties of building composites based on calcium sulfate: monograph. Under the general editorship of Buryanov A.F.] Moscow: De Nova. 2012. 195 p.
9. Buryanov A.F., Petropavlovskii K.S., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B. Formation of the spatial structure of a condensed system of calcium sulphate dihydrate. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1425. Modelling and Methods of Structural Analysis. 13–15 November 2019. Moscow, Russian Federation. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012194

11. Клименко В.Г., Павленко В.И., Елистраткин М.Ю. Комплексные активаторы твердения ангидрита на основе сульфата аммония // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 5. С. 28–30.
12. Аниканова А.Л., Волкова О.В., Кудяков А.И., Курмангалиева А.И. Активированное композиционное фторангидритовое вяжущее // *Строительные материалы*. 2019. №1–2. С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42>
13. Кудяков А.И., Аниканова Л.А., Редлих В.В., Саркисов Ю.С. Влияние сульфата и сульфита натрия на процессы структурообразования фторангидритовых композиций // *Строительные материалы*. 2012. № 10. С. 50–52.
14. Shuhua Liu, Jiayi Ouyang, Jun Ren. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 243. 118226. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118226)
15. Kramar L.Y., Trofimov B.Y., Chernykh T.N. Properties and modification of anhydrite binder from technogenic raw materials. *Innovative materials and technologies KNAUF-GARANT of quality and safety in modern construction. Collection of reports of the fifth scientific conference LLC KNAUF GIPS*. Chelyabinsk. 2012. 58 p.
16. Токарев Ю.В., Яковлев Г.И. Модифицирование ангидритовых композиций алюмосодержащими ультрадисперсными добавками // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2009. № 1 (11). С. 302–308.
17. Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Волкова О.В., Первушина Д.М. Влияние пластифицирующих добавок на свойства газогипсовых материалов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 22 (1). С. 106–117. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-106-117>
18. Gazdič D., Stachová J., Magrla R. Modification of natural anhydrite by mixed exciter // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1100. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.56>
19. Fedorchuk Y.M., Zamyatin N.V., Smirnov G.V. et al. Prediction of the properties anhydrite construction mixtures based on neural network approach // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. № 1. 012039. DOI: [10.1088/1742-6596/881/1/012039](https://doi.org/10.1088/1742-6596/881/1/012039)
20. Калабина Д.А., Яковлев Г.И., Кузьмина Н.В. Безусадочные фторангидритовые композиции для устройства полов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. № 1 (55). С. 24–38. DOI: [10.52409/20731523_2021_1_24](https://doi.org/10.52409/20731523_2021_1_24)
10. Klimentko V.G. The role of double salts based on sulfates Na⁺, K⁺, Ca²⁺, NH₄⁺ in the technology of obtaining anhydrite binders. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 12, pp. 119–125. (In Russian). DOI: [10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605](https://doi.org/10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605)
11. Klimentko V.G., Pavlenko V.I., Elistratkin M.Y. Complex anhydrite hardening activators based on ammonium sulfate. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2013. No. 5, pp. 28–30. (In Russian).
12. Anikanova L.A., Volkova O.V., Kudyakov A.I., Kurmangalieva A.I. Mechanically activated composite fluoroanhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019. No. 1–2, pp. 36–42. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42>
13. Kudyakov A.I., Anikanova L.A., Redlikh V.V., Sarkisov Yu.S. Influence of sulfate and sulfite of sodium on the processes of structure formation of fluoroanhydrite compositions. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2012. No. 10, pp. 50–52. (In Russian).
14. Shuhua Liu, Jiayi Ouyang, Jun Ren. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 243. 118226. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118226)
15. Kramar L.Y., Trofimov B.Y., Chernykh T.N. Properties and modification of anhydrite binder from technogenic raw materials. *Innovative materials and technologies KNAUF-GARANT of quality and safety in modern construction. Collection of reports of the fifth scientific conference LLC KNAUF GIPS*. Chelyabinsk. 2012. 58 p.
16. Tokarev Yu.V., Yakovlev G.I. Modification of anhydrite compositions with aluminum-containing ultrafine additives. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2009. No. 1 (11), pp. 302–308. (In Russian).
17. Anikanova L.A., Kurmangalieva A.I., Volkova O.V., Pervushina D.M. Gas-gypsum materials properties modified by plasticizing agents. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020. Vol. 22 (1), pp. 106–117. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-106-117> (In Russian).
18. Gazdič D., Stachová J., Magrla R. Modification of natural anhydrite by mixed exciter. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1100. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.56>
19. Fedorchuk Y.M., Zamyatin N.V., Smirnov G.V. et al. Prediction of the properties anhydrite construction mixtures based on neural network approach. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. No. 1. 012039. DOI: [10.1088/1742-6596/881/1/012039](https://doi.org/10.1088/1742-6596/881/1/012039)
20. Kalabina D.A., Yakovlev G.I., Kuz'mina N.V. Non-shrinking fluoroanhydrite compositions for flooring. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021. No. 1 (55), pp. 24–38. (In Russian). DOI: [10.52409/20731523_2021_1_24](https://doi.org/10.52409/20731523_2021_1_24)

С.С. ИНОЗЕМЦЕВ¹, канд. техн. наук (inozemtsevss@mail.ru);
Е.В. КОРОЛЕВ², д-р техн. наук (korolev@nocnt.ru);
Т.Ч. ДО¹, инженер (аспирант) (trongtoan007@gmail.com)

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

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4)

Самовосстановление асфальтобетона с использованием инкапсулированного модификатора

Получены результаты получения композитов из термопластичной смеси, после приготовления и уплотнения которой капсулы с модификатором остаются целостными, а в период формирования напряжений в структуре и образования дефектов способны разрушаться для высвобождения инкапсулированного модификатора. Возможность создания капсул, содержащих модификатор для самовосстанавливающегося асфальтобетона, обосновывается значительным отличием напряженных состояний в материале при воздействии нагрузок, возникающих на технологическом этапе в процессе приготовления асфальтобетонной смеси или ее уплотнения и в период эксплуатации асфальтобетона в дорожном покрытии. В асфальтобетонной смеси величина напряжений определяется дисперсностью минеральной части и геометрическими характеристиками капсул. В асфальтобетоне целостность капсул определяется способностью сопротивляться напряжениям, возникающим в композите, и зависит как от величины внутренних напряжений, которые увеличиваются в процессе эксплуатации, так и от геометрических характеристик капсул. При оптимальном содержании капсул с органическим восстановителем коэффициент восстановления показывает, что при повторном сжатии общие потери прочности с учетом действия модификатора уменьшаются на 28%. Для композита с оптимальным содержанием инкапсулированного модификатора на основе AR-полимера коэффициент восстановления показывает, что общие потери прочности с учетом действия модификатора на 46% меньше. При этом эффективность восстановления с применением инкапсулированного модификатора на основе AR-полимера в 1,87 раза больше, чем при использовании инкапсулированного модификатора на основе органического восстановителя.

Ключевые слова: самовосстановление, асфальтобетон, структура, капсула, модификатор, оболочка.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10051 <https://rscf.ru/project/22-79-10051/>

Для цитирования: Иноземцев С.С., Королев Е.В., До Т.Ч. Самовосстановление асфальтобетона с использованием инкапсулированного модификатора // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-57-69>

S.S. INOZEMTSEV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (inozemtsevss@mail.ru);

E.V. KOROLEV², Doctor of Sciences (Engineering) (korolev@nocnt.ru), T.Ch. DO¹, Engineer (postgraduate student) (trongtoan007@gmail.com)

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

² Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeyskaya Street, Saint Petersburg 190005, Russian Federation)

Self-Healing of Asphalt Concrete Using Encapsulated Modifier

The results of obtaining composites from a thermoplastic mixture are obtained, after preparation and compaction of which, capsules with a modifier remain intact, and during the period of stress formation in the structure and the formation of defects, they are able to break down to release the encapsulated modifier. The possibility of creating capsules containing a modifier for self-healing asphalt concrete is justified by a significant difference in stress states in the material under the influence of loads that occur at the technological stage during the preparation of the asphalt concrete mixture or its compaction and during the operation of asphalt concrete in the road surface. In an asphalt concrete mixture, the magnitude of stresses is determined by the dispersion of the mineral part and the geometric characteristics of the capsules. In asphalt concrete, the integrity of the capsules is determined by the ability to resist stresses arising in the composite, and depends both on the magnitude of internal stresses that increase during operation and on the geometric characteristics of the capsules. At the optimal content of capsules with an organic reducing agent, the recovery coefficient shows that during repeated compression, the total strength loss, taking into account the action of the modifier, turned out to be 28% less. For a composite with an optimal content of an encapsulated modifier based on an AR polymer, the recovery coefficient reflects that the total strength loss, taking into account the action of the modifier, is 46% less. At the same time, the recovery efficiency with the use of an encapsulated modifier based on an AR polymer is 1.87 times higher than when using an encapsulated modifier based on an organic reducing agent.

Keywords: self-healing, asphalt concrete, structure, capsule, modifier, shell.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-10051 <https://rscf.ru/project/22-79-10051/>

For citation: Inozemtsev S.S., Korolev E.V., Do T.Ch. Self-healing of asphalt concrete using encapsulated modifier. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 58–69. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-58-69>

Асфальтобетоны эксплуатируются в среде с циклическим воздействием механических нагрузок, основным источником которых являются транспортные средства и градиент температуры. При этом свойства компонентов асфальтобетона постоянно изменяются под действием кислорода воздуха, солнечной радиа-

ции, химических агентов, применяемых при эксплуатации дорог и т. д. Это приводит к трещинообразованию, что является основной причиной сокращения периода эксплуатации дорожных покрытий автомобильных дорог [1, 2]. Улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетона достигается использо-

ванием в составе асфальтобетонных смесей функциональных модификаторов. Классические добавки улучшают способность асфальтобетона сопротивляться динамическим воздействиям [3, 4], продлевая сроки начала трещинообразования. Новый вид добавок, обеспечивающих способность асфальтобетона к самовосстановлению [5, 6], способствует ликвидации части дефектов на этапе эксплуатации, сохраняя функциональность материала. В настоящий момент большое количество исследований [5–9] направлено на разработку новых решений, позволяющих создавать эффективные самовосстанавливающиеся асфальтобетоны. Сложность разработки таких решений в асфальтобетонах обусловлена как термопластичной природой вяжущего вещества, так и технологическими особенностями производства материала.

Образование и развитие трещин в асфальтобетоне происходит в матричном материале или в зоне контакта «вяжущее вещество – заполнитель». Дефекты на начальном этапе образуются на микромасштабном уровне с дальнейшим развитием в макротрещины. Эффективность процесса заживления асфальтобетона, направленного на формирование связей в структуре, зависит как от управляемых факторов, так и от неуправляемых факторов, определяемых условиями эксплуатации дорожной конструкции (рис. 1).

К управляемым факторам относятся рецептурные и технологические параметры производственного процесса получения асфальтобетона, которые регулируются на этапе проектирования состава асфальтобетонной смеси и технологических параметров изготовления дорожного покрытия. Управление самовосстанавливающей способностью асфальтобетона достигается за счет двух основных компонентов: битума и специальных модификаторов.

Способность битума самостоятельно ликвидировать дефекты в структуре обуславливается его термопластичными свойствами и обеспечивается самопроизвольным сближением молекул битума на расстояние межмолекулярного взаимодействия [10]. Эти процес-

сы обуславливают собственный потенциал к самовосстановлению битума, который зависит от содержания вяжущего в асфальтобетоне и его группового состава.

Использование различных модификаторов для интенсификации процесса самозалечивания является одним из эффективных способов не только целенаправленного изменения структуры и свойств асфальтобетона, но и обеспечения его самозалечивания. При этом природа используемого модификатора и его степень сродства с битумом будет влиять не только на эффективность самовосстановления, но и на механизм этого процесса. Так, например, инкапсулированный «омолаживатель» способен увеличить собственный потенциал самовосстановления битума за счет изменения его группового состава [11]. Инкапсулированный полимерный модификатор выступает в качестве склеивающего агента, формируя новые структурные связи [12].

Неуправляемыми факторами, которые влияют на самовосстановление асфальтобетона, являются температура окружающей среды и время ее воздействия. Влияние температуры обусловлено термопластичными свойствами битума в составе асфальтобетона, когда за счет вязкоупругого течения происходит закрытие макротрещин, предотвращая их развитие. Интенсивность этого процесса зависит от межмолекулярного расстояния и скорости теплового движения молекул, которая закономерно увеличивается с ростом температуры. Важным условием протекания процесса самовосстановления в период эксплуатации при повышенных температурах является отсутствие значительных пластических деформаций. Так, при увеличении температуры кинетическая энергия вращательного и колебательного движения молекул вяжущего вещества возрастает, что естественно приводит к росту расстояния между молекулами. Следствием этого является увеличение объема материала и снижение вязкости у термопластического материала [13, 14]. В этом случае в зоне дефекта (трещины) при достаточной близости ее поверхностей может возникнуть контакт, способствующий их самопроизвольному сращиванию. Здесь важно учитывать условия, возникающие в зоне контакта:

1) в зоне контакта находится газовая фаза;

2) в зоне контакта находится вещество модификатора.

Теоретическим обоснованием реализации механизма самовосстановления в первом случае является рассмотрение дефекта с привлечением давления Лапласа. Представим дефект как две поверхности, имеющие радиус кривизны R , между которыми находится газовая фаза. На каждой поверхности возникает давление Лапласа, которое направлено во внутренний объем каждой фазы, формирующей поверхность дефекта. Это давление препятствует самопроизвольному самовосстановлению. Исходя из формулы Лапласа:

$$P_L = 2\sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad (1)$$

(σ – поверхностное натяжение) вариантами преодоления этого давления является снижение поверхност-

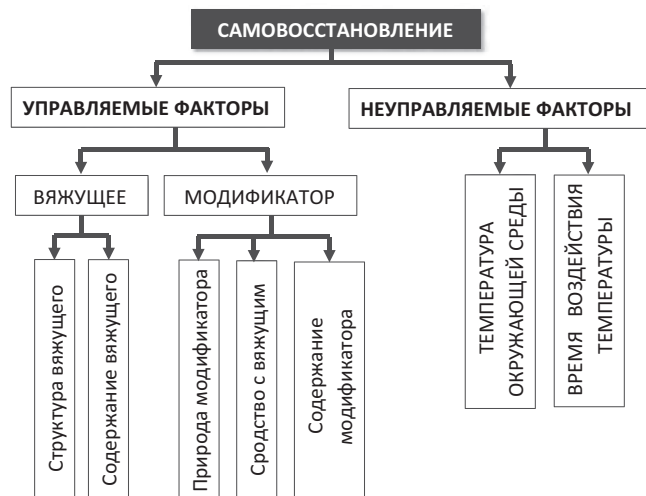


Рис. 1. Декомпозиция факторов, влияющих на самовосстановление асфальтобетонов

Fig. 1. Decomposition factors affecting the self-healing of asphalt concrete

ного натяжения или увеличение радиуса кривизны. Повышение температуры обеспечивает выполнение этих условий для самовосстановления; скорость процесса определяется вязкостью вяжущего.

Теоретическим обоснованием механизма самовосстановления во втором случае является описание энтальпии растворения, предложенное Дж. Хильдебрандом [15]:

$$\Delta H_m = V_m (\delta_1 - \delta_2)^2 X_1 X_2 \quad (2)$$

(V_m – объем; δ_i – параметр растворимости; X_i – объемная доля компонента), из которого следует, что при равенстве параметров растворимости контактирующих сред энтальпия процесса растворимости $\Delta H_m = 0$ и изобарно-изотермический потенциал процесса определяются только энтропийной составляющей потенциала Гиббса.

Анализ формулы Дж. Хильдебранда указывает на перспективность не только поиска веществ с параметром растворимости, близким к параметру растворимости битума, но и важность поиска смесевых составов, состоящих из растворителя и полимера, для повышения адгезии и когезии в зоне контакта «субстрат–адгезив».

Отсюда следует, что температура будет оказывать влияние как на собственный потенциал битума к самовосстановлению, так и на интенсивность физико-химических процессов взаимодействия с модификатором. Стоит отметить, что температура является фактором реверсивного действия, который при наличии достаточного количества мальтеновой фракции в битумной матрице асфальтобетона положительно сказывается на процессе залечивания, тогда как при ее недостатке температура является условием старения вяжущего и не способствует процессу самопроизвольного сращивания молекул. Данный аспект является важным при выборе вяжущего, и его необходимо учитывать при проектировании асфальтобетона.

В настоящей работе экспериментально установлен эффект самовосстановления асфальтобетона за счет использования инкапсулированных модификаторов, а также доказано, что после уплотнения смеси капсулы остаются целостными и разрушаются при формировании дефектов.

Материалы и методы исследования

В качестве основных компонентов для приготовления композита для дорожного строительства с термопластической матрицей, обладающего способностью самовосстановления, использовались: вяжущее вещество, минеральные материалы, функциональные добавки и инкапсулированный модификатор, состоящий из восстанавливающего и инкапсулирующего агентов.

В качестве вяжущего вещества для формирования термопластичной матрицы в композите для дорожного строительства использовался битум БНД 60/90, отвечающий требованиям ГОСТ 22245–90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия».

Основные свойства применяемого битума представлены в табл. 1.

В качестве инкапсулирующего агента (инкапсулятора) использовался альгинат натрия ($C_6H_7O_6Na$), представляющий собой натриевую соль альгиновой кислоты, экстрагированной из бурых водорослей [16].

В качестве восстановителей для самовосстановления рассмотрены традиционный восстанавливающий агент на основе подсолнечного масла и восстанавливающий агент на основе тиолсодержащего уретанового AR-полимера [9]. Основные свойства подсолнечного масла представлены в табл. 2.

AR-полимер представляет собой тиолсодержащий уретановый полимер с концевыми меркаптано-выми группами (SH–), произведенный ООО «Поли-Микс Казань» в соответствии с ТУ 2226-001-90014974-11 (<https://polymix.pro/products/arpolymer>). Отвердителем для используемого полимера является тетраметилтиурамдисульфид (ТМТД) $C_6H_{12}N_2S_4$. Основные свойства полимера представлены в табл. 3.

Технологический процесс инкапсулирования модификатора (восстановителя) для асфальтобетона включает пять основных стадий: приготовление альгинатного раствора с помощью высокоскоростной мешалки; приготовление альгинатной эмульсии модификатора (восстановителя) с помощью высокоскоростной мешалки; деление альгинатной эмульсии

Таблица 1
Table 1

Основные свойства применяемого битума
Main properties of bitumen

| Показатель | Ед. изм. | Значение | Метод |
|---|----------|-------------|----------------------------------|
| Глубина проникновения иглы при 25°C при 0°C | 0,1 мм | 67 36 | ASTM D5/D5M-20 EN 1426:2015 |
| Растяжимость при 25°C при 0°C | мм | 85,2 3,6 | ASTM D113-17 EN 13589:2018 |
| Температура вспышки | °C | 51 | ASTM D36/D36M-20 EN 1427:2015 |
| Температура хрупкости по Фраасу | °C | -20 | EN 12593:2015 |

Таблица 2
Table 2

Свойства подсолнечного масла
Properties of sunflower oil

| Показатель | Ед. изм. | Значение | Метод |
|---|-------------------|------------|-----------------------------------|
| Динамическая вязкость при 25°C | Па·с | 0,05 | ASTM D 4402:2006 EN 13302:2010 |
| Плотность при 25°C | г/см ³ | 0,918±0,05 | ГОСТ 3900–85 |
| Кислотное число | мг КОН/г | 0,025±0,01 | ГОСТ 31933–2012 |
| Групповой состав: пальмитиновая кислота | % | 6,61 | ГОСТ 31663–2012 |
| стеариновая кислота | % | 3,61 | |
| олеиновая кислота | % | 30,91 | |
| линолевая кислота | % | 57,13 | |
| другие | % | 1,74 | |

Таблица 3
Table 3Свойства AR-полимера
Properties of AR-polymer

| Показатель | Ед. изм. | Значение |
|--|----------|----------|
| Динамическая вязкость при 25°C | Па·с | 9,7 |
| Содержание SH-групп | % | 1,5–2,5 |
| Прочность при растяжении после отверждения | МПа | 1 |
| Относительное удлинение при разрыве | % | 100 |
| Постоянные деформации | % | до 6 |

модификатора (восстановителя) на отдельные капли; закрепление отдельных капель альгинатной эмульсии модификатора (восстанавливающего агента) через раствор кальциевой соли в альгинатные шарики; сушка альгинатных шариков. Технологическая схема инкапсулирования модификатора (восстановителя) для асфальтобетона представлена на рис. 2 [12, 16, 17].

Приготовление раствора кальциевой соли осуществляется в смесителе принудительного действия до полного растворения CaCl_2 в воде. Для приготовления альгинатной эмульсии в воду сначала добавляется альгинат натрия, который смешивается высокоскоростным смесителем (не менее 2000 об/мин), после чего в полученный раствор добавляется модификатор (восстанавливающий агент), который после интенсивного смешивания преобразуется в эмульсию. Полученная эмульсия с помощью делительной воронки делится на отдельные частицы (альгинатные шарики), которые закрепляются ионами кальция, проходя через ванну с раствором кальциевой соли. На заключительном этапе альгинатные шарики подвергаются сушке до постоянной массы при температуре 50°C. Внешний вид инкапсулированного модификатора показан на рис. 3. Свойства полученного инкапсулированного модификатора представлены в табл. 4.

Оценка физико-механических свойств капсул проводилась по предельным нагрузкам, которые они выдерживают при раскалывании. Предельную на-

Рис. 2. Схема производства инкапсулированного модификатора
Fig. 2. Scheme for the production of an encapsulated modifier

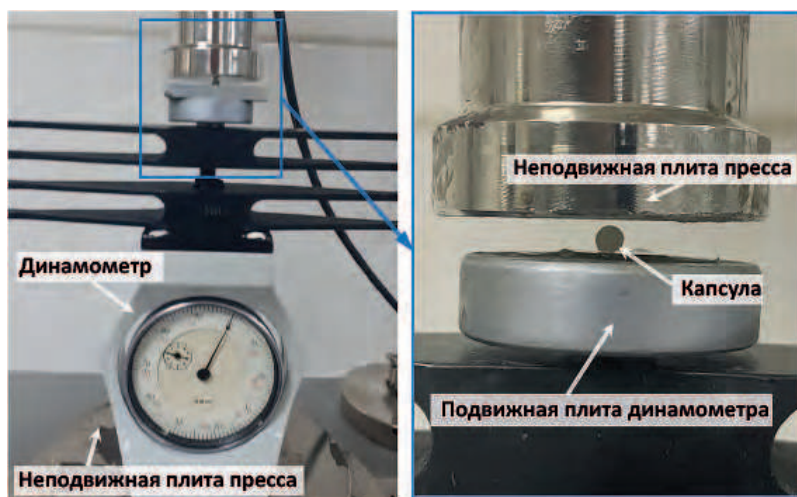
грузку определяли на механическом прессе Uniframe с использованием динамометра с максимальным пределом измерения 1 кН (рис. 4). Скорость приложения нагрузки во время испытания поддерживалась на постоянном уровне 10 Н/с.

Для обеспечения необходимого зернового состава минеральные компоненты смешивались в следующем соотношении: крупный заполнитель – 67%; мелкий заполнитель – 21%; наполнитель – 12%. Агрегатный состав минеральной части разработанного композита представлен в табл. 5.

Оптимальное содержание вяжущего составляет 7%, что позволяет достичь воздушной пустоты щебеночно-мастичных асфальтобетонов 3%. В качестве стабилизирующей добавки для предотвращения сегрегации щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси использовали целлюлозные волокна Viator 66 в количестве 0,3%.

В работе исследовались термопластичные композиты, приготовленные на битуме и комплексном вяжущем, состоящем из смеси битума с функциональными добавками оксида марганца, серы и тетраметилтиурамдисульфида. Для приготовления комплексного вяжущего в разогретый до температуры 120°C битум добавлялось 0,33%; 1,22% и 2% от массы битума соответственно ТМТД, оксид марганца и сера.

Оценку эффективности формирования структуры на границе раздела фаз «битум – минеральный мате-

Рис. 3. Инкапсулированный модификатор
Fig. 3. Encapsulated modifierРис. 4. Устройство для определения максимальной нагрузки капсул
Fig. 4. Device for determining the maximum loading of capsules

**Таблица 4
Table 4**

**Свойства капсул с модификатором [12]
Encapsulated Modifier Properties [12]**

| Показатель | Ед. изм. | Значение |
|----------------------------------|----------|----------|
| Радиус капсул | мм | 1,3 |
| Содержание модификатора | % | 83 |
| Максимальная нагрузка при сжатии | Н | 19 |

**Таблица 5
Table 5**

**Гранулометрический состав минеральной части
разработанного композита
Granulometric composition of the mineral part
of the developed composite (Particle Size Distribution)**

| Показатель | Значение | | | | | | | |
|----------------------|----------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | 0,071 |
| Размер сита, мм | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | 0,071 |
| Проход через сито, % | 100 | 37,3 | 27,2 | 21,8 | 18,7 | 18,3 | 15,8 | 12,6 |

риал» рационально проводить по свойствам, которые отражают состояние структуры в начальный период эксплуатации, например водостойкость, предел прочности при сжатии при различной температуре и сдвигоустойчивость. Основные свойства разработанного композита представлены в табл. 6.

Асфальтобетонная смесь после приготовления использовалась для изготовления образцов-цилиндров высотой и диаметром 71,4 мм. Для этого смесь необходимой массы помещалась в форму и уплотнялась в два этапа: с помощью вибрирования и груза, обеспечивающего нагрузку 30 ± 5 кН в течение 3 мин, и последующего уплотнения с помощью гидравлического пресса, обеспечивающего давление $20 \pm 0,5$ МПа в течение 3 мин. Затем образец извлекается из формы с помощью выпрессовочного устройства.

Смеси готовили с содержанием капсул 1,5; 3; 4,5; 9 и 13,5% по массе битума, который добавляли на стадии смешивания сухих компонентов.

Для исследования структуры композита с инкапсулированным модификатором с использованием метода рентгеновской томографии применялся томограф V|TOME|X M300, General Electric, с помощью которого «послойно» осуществлялось сканирование образца с дальнейшим преобразованием 2400 снимков сечения в 3D-модель.

Для расчета коэффициента восстановления использовались значения предела прочности при сжатии при температуре 20°C, полученные при циклическом разрушении и периодах восстановления. Изготовленные образцы асфальтобетона термостатировались в климатической камере при температуре 20°C в течение не менее 2 ч, после чего испытывались при сжатии со скоростью нагружения 3 мм/мин и определялась максимальная нагрузка при разрушении. После этого образцы в течение 7 сут хранились при температуре 20°C, затем повторно термостатировались и подвергались сжатию. Испытания включали в себя четыре теста при сжатии и три периода восстановления по 7 сут. На рис. 5 показан вид образца до тестов и после каждого теста при сжатии.

Результаты исследований

Технология самовосстановления, реализуемая в строительных материалах, предполагает использование инкапсулированных модифицирующих функциональных добавок, момент активизации которых наступает при разрушении капсул-носителей при образовании или развитии трещины [18–23]. Развитие технологии самовосстановления с применением инкапсулированного модификатора в асфальтобетонах сопряжено с рядом сложностей, обусловленных производственными особенностями. Капсулы, содержащие модификатор, при использовании в составе асфальтобетонной смеси должны обладать термической стойкостью [12] и достаточной прочностью для обеспечения целостности в процессе приготовления смеси и ее уплотнения соответственно. В случае если максимальная нагрузка, которую способны выдер-

**Таблица 6
Table 6**

**Основные свойства разработанного композита
The main properties of the developed composite**

| Показатель | Ед. изм. | Требования ГОСТа | Значение для вяжущего | |
|--|-------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| | | | Битум | Комплексное вяжущее |
| Средняя плотность | г/см ³ | – | 2,43 | 2,43 |
| Пористость минеральной части | % | 15–19 | 18 | 18 |
| Остаточная пористость | % | 1,5–4,5 | 3 | 3 |
| Водонасыщение | % | 1–4 | 1,9 | 3,2 |
| Предел прочности при сжатии: при 20°C при 50°C | МПа | Не менее 2,2 | 3 | 4 |
| | МПа | Не менее 0,65 | 1,1 | 1,2 |
| Сдвигоустойчивость: коэффициент внутреннего трения показатель сцепления при 50°C | – | Не менее 0,93 | 0,93 | 0,95 |
| | МПа | Не менее 0,18 | 0,56 | 0,74 |
| Предел прочности при раскалывании 0°C | МПа | 2,5–6 | 2,6 | 3,3 |
| Водостойкость длительная | – | Не менее 0,85 | 0,92 | 0,89 |

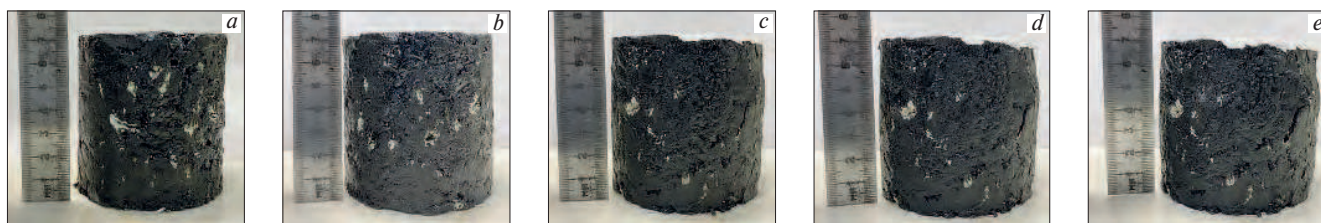


Рис. 5. Вид образца до тестов и после каждого испытания при сжатии: *a* – до тестов; *b* – после 1-го теста; *c* – после 2-го теста; *d* – после 3-го теста; *e* – после 4-го теста

Fig. 5. Sample before tests and after each compression test: *a* – before tests; *b* – after 1 test; *c* – after 2 tests; *d* – after 3 tests; *e* – after 4 tests

жать капсулы при уплотнении, меньше минимальной нагрузки, необходимой для уплотнения асфальтобетонной смеси, модификатор будет преждевременно попадать в матрицу материала, что в некоторых случаях может приводить к разуплотнению смеси или снижению сдвиговой устойчивости. При этом избыточная прочность будет препятствовать разрушению капсул и самовосстанавливающий процесс не будет инициирован в период эксплуатации.

Исследования рецептурно-технологических свойств суспензий, из которых осуществляется производство кальций-альгинатных капсул, показали, что регулирование состава суспензий позволяет осуществлять управление размером и толщиной стенок капсул, а соответственно и физико-механическими свойствами, в том числе прочностью [17].

Рассматривая капсулы как сферическую оболочку, расположенную в объеме матрицы с различными структурно-механическими свойствами, ее стенки подвергаются как внешнему, так и внутреннему давлению. Сила, которая действует изнутри на стенки в течение всего жизненного цикла капсулы, является постоянной, а величина давления на внешнюю сторону оболочки изменяется в процессе структурных преобразований матрицы [17].

При этом общее давление на стенку (оболочку) капсулы будет определяться результирующей силой $P = P_{ex} + P_{in}$, где P_{ex} – внешнее давление, зависящее от свойств матрицы, в которой находится капсула, и условий внешнего воздействия; P_{in} – внутреннее давление, зависящее от объема модификатора и его свойств. Также принято условие, что стенки капсул под нагрузкой проявляют в основном упруго-хрупкие свойства, а давление, возникающее на поверхности капсул, равномерно распределяется через прослойку битумного вяжущего.

В процессе жизненного цикла от приготовления асфальтобетонной смеси до этапа ее уплотнения и эксплуатации дорожного покрытия капсулы с модификатором находятся в различных напряженных состояниях, что обуславливается термопластичными свойствами матрицы композита.

На этапе приготовления асфальтобетонной смеси расплав битумного вяжущего обеспечивает вязкотекучие свойства материала [24–26], за счет чего при приложении нагрузки вращающимися механизмами смесителя частицы дисперсной фазы способны без значительного сопротивления перемещаться в объеме. В этом случае возникающие усилия не приводят

Таблица 7
Table 7

Предел прочности при сжатии щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) с инкапсулированным модификатором
Compressive strength of crushed-stone-mastic asphalt concrete with encapsulated modifier

| Содержание капсул, % | Предел прочности при сжатии через время, сут, МПа | | | |
|----------------------|---|------|------|------|
| | 1 | 7 | 14 | 21 |
| – | 2,96 | 2,22 | 1,75 | 1,58 |
| | 4,02 | 3,4 | 3,03 | 2,91 |
| 1,5 | 2,81 | 2,29 | 1,95 | 1,83 |
| | 3,7 | 3,33 | 2,99 | 2,92 |
| 3 | 2,72 | 2,22 | 1,92 | 1,81 |
| | 3,59 | 3,25 | 3,17 | 3,06 |
| 4,5 | 2,57 | 2,04 | 1,8 | 1,66 |
| | 3,55 | 3,2 | 3,06 | 2,91 |
| 9 | 2,25 | 1,86 | 1,56 | 1,43 |
| | 3,42 | 2,86 | 2,6 | 2,38 |
| 13,5 | 2,02 | 1,62 | 1,4 | 1,3 |
| | 3,35 | 2,81 | 2,57 | 2,27 |

к концентрации напряжений в области капсул, а расходятся преимущественно на преодоление вязкого сопротивления матрицы движению отдельных частиц дисперсной фазы.

На этапе уплотнения асфальтобетонной смеси термопластичная матрица находится в вязкопластичном состоянии в соответствии с законом Паскаля [27], при равномерном распределении и полном обволакивании расплавом вяжущего зерен дисперсной фазы способствует равномерному распределению давления через прослойки битума на общую площадь поверхности минеральной части:

$$\sigma_c = P/S_{f,i}, \quad (3)$$

где P – давление, передаваемое на поверхность покрытия при уплотнении смеси, Н;

$S_{f,i} = S_{u,i} m_f = \sum_{i=1}^n \frac{6 \cdot C_i}{\rho_f d_{f,i}} \cdot 10^4$ – площадь поверхности, которую образует дисперсная фаза, где $S_{u,i}$ – удельная поверхность; ρ_f – средняя плотность дисперсной фазы; $d_{f,i}$ – диаметр частицы; C_i – содержание частиц диаметром $d_{f,i}$.

Важным условием получения эффективного асфальтобетона является приложение необходимого давления при уплотнении, обеспечивающего требу-

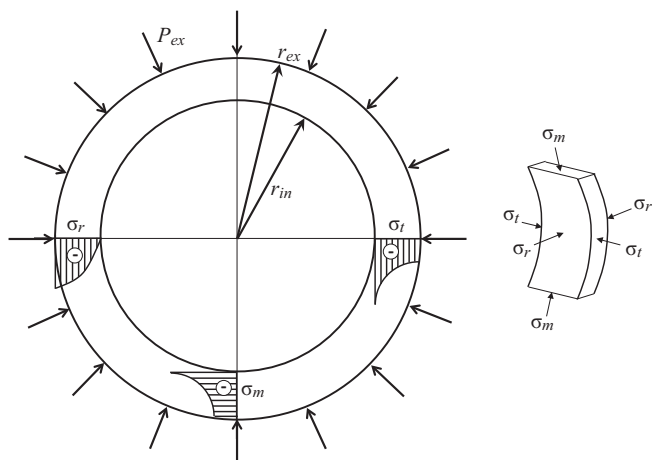


Рис. 6. Схема распределения давления на капсулу при уплотнении асфальтобетонной смеси

Fig. 6. Loading model of capsules during compaction of asphalt concrete mixture

мую структуру с заданным значением показателя пористости. В зависимости от давления при уплотнении асфальтобетонной смеси форсируется различный по структуре асфальтобетон. При уплотнении асфальтобетонной смеси происходит сближение зерен минерального заполнителя в результате их перегруппировки, межзерновые пустоты заполняются битумом в результате его перераспределения, вследствие чего увеличивается плотность асфальтобетона и формируется структура с оптимальным содержанием пустот.

Эффективные капсулы для самовосстанавливающегося асфальтобетона должны быть устойчивы к давлению (P_c) или напряжениям (σ_c), вызванным этим давлением, которые возникают в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси. При этом разрушение капсул должно происходить при давлении (P_0) или напряжениях (σ_0), возникающих в процессе эксплуатации дорожного покрытия. Тогда область оптимальных значений, при которых достигается целостность капсул при уплотнении и хрупкость при эксплуатации, определяется из условия $P_c < P \leq P_0$ или $\sigma_c < \sigma \leq \sigma_0$.

Определение значения уплотняющей нагрузки позволит оптимизировать производство капсул с учетом полученных граничных значений, что является актуальной задачей при реализации технологии самовосстановления с использованием инкапсулированного модификатора.

При уплотнении асфальтобетонной смеси на капсулы с модификатором оказывает воздействие давление, что можно представить в виде схемы с действующими напряжениями по трем направлениям – осевому (σ_t), радиальному (σ_r) и меридиональному (σ_m) (рис. 6). Распределение напряжений показано в виде эпюр.

Принимается, что максимальное допустимое значение давления при уплотнении асфальтобетонной смеси P_{com} будет соответствовать тому значению, при котором достигается предел прочности при сжатии материала σ_u стенок капсулы на ее внутренней поверхности:

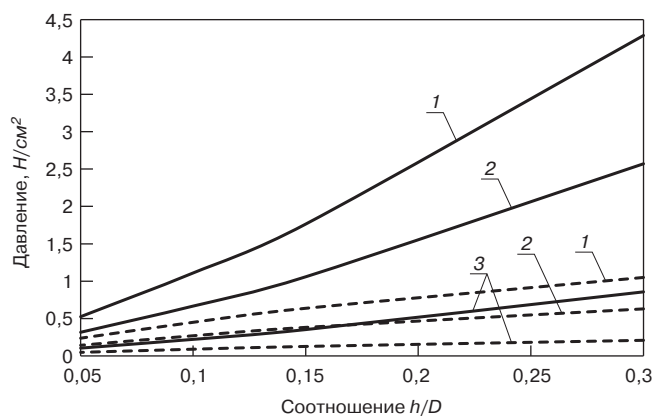


Рис. 7. Изменение теоретической прочности капсул (сплошная линия) и максимального давления уплотнения (штриховая линия) от h/D при различной прочности материала капсулы: 1 – $\sigma_u=2,5$ Н/см²; 2 – $\sigma_u=1,5$ Н/см²; 3 – $\sigma_u=0,5$ Н/см²

Fig. 7. Change in theoretical strength of capsules (solid line) and maximum compaction pressure (dashed line) from h/D at different strength of the capsule material: 1 – $\sigma_u= 2.5$ Н/см²; 2 – $\sigma_u=1.5$ Н/см²; 3 – $\sigma_u=0.5$ Н/см²

$$P_{com} = \frac{\sigma_u}{2} \cdot \left(1 - \frac{r_B^2}{r_H^2}\right) = 2\sigma_u \frac{h}{D} \left(1 - \frac{h}{D}\right) \quad (4)$$

при $r_H = D/2$ и $r_B = D/2 - h$, где D – диаметр капсулы; h – толщина стенки капсулы.

В процессе уплотнения смеси происходит распределение нагрузок и капсулы подвергаются равномерному и всестороннему гидростатическому сжатию, в результате которого предельное состояние в материале наступит при напряжениях по всей толщине стенок капсул, равных пределу прочности при сжатии.

В соответствии с [28] напряжения и деформации сферического тела зависят только от координат в радиальном направлении, а уравнение равновесия содержит три действующих напряжения:

$$(\sigma_r - \sigma_t) + (\sigma_r - \sigma_m) + r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} = 0. \quad (5)$$

В предельном состоянии $(\sigma_r - \sigma_t) = (\sigma_r - \sigma_m) = \sigma_u$, при граничных условиях $\sigma_r(r_H) = -p$ и $\sigma_r(r_B) = 0$ величина предельного давления при уплотнении смеси рассчитывается в соответствии с формулой:

$$P_T \cong 4\sigma_u \cdot \frac{h}{D} \cdot \left(1 - \frac{h}{D}\right)^{-1}. \quad (6)$$

При инкапсулировании модификатора основная задача с учетом прочности материала стенок капсулы – сформировать необходимые ее геометрические параметры (h/D), при которых обеспечивается прочность капсул, превышающая распределенную нагрузку при уплотнении (рис. 7).

Результаты расчета показывают, что регулирование толщины и/или диаметра капсул с восстановителем позволяет синтезировать инкапсулированный модификатор с заданной прочностью для обеспечения необходимой стойкости к давлению в процессе уплотнения. Увеличение толщины стенок капсул приводит к закономерному увеличению прочности капсул и максимально допустимого давления при уплотнении. Теоретическая прочность закономерно выше максимально допустимого давления в процессе уплотнения, так как при ее расчете не учитываются дефекты, рас-

пределенные в материале оболочки капсулы. Очевидно, что с увеличением объема оболочки (доли оболочки в объеме капсулы) вероятность возникновения критического дефекта возрастает (эффект Вейбулла). Однако эта вероятность все же меньше увеличения прочности, которое происходит при росте оболочки капсулы. Чем выше прочность материала стенок капсул, тем выше прочность капсулы и соответственно максимально допустимое давление в процессе уплотнения. При этом прочность материала капсул и их геометрические параметры должны обеспечивать получение значения максимально допустимого давления в процессе уплотнения, которое превышает фактическое значение распределенной нагрузки на суммарную площадь дисперсной фазы в смеси.

Технология самовосстановления, реализуемая с применением инкапсулированного модификатора, направлена на иницирование вторичного процесса структурообразования в период эксплуатации, в результате которого происходит формирование дополнительных структурных связей. В результате реализации такого подхода происходит восстановление баланса структурных связей и состояния структуры материала, способное функционировать в дорожной конструкции.

При этом особенности термопластичной матрицы обуславливают наличие восстановительного эффекта за счет собственного потенциала вяжущего [28]. Этот эффект обуславливается способностью молекул органического вяжущего самопроизвольно спутываться между собой. Интенсивность данного процесса зависит от близости молекул и скорости самопроизвольного движения, которое увеличивается с ростом температуры.

Использование достаточного количества инкапсулированного модификатора позволит восстановить большее количество структурных связей, чем за счет собственного восстановительного потенциала вяжущего. Для исследования восстановительного эффекта для асфальтобетонов, приготовленных на основе битума и комплексного вяжущего, использовался инкапсулированный модификатор на основе органического восстановителя и AR-полимера.

Для определения оптимального содержания инкапсулированного модификатора изготавливались смеси с содержанием капсул 1,5; 3; 4; 9 и 13,5% от массы битума, которые добавлялись на этапе смешивания сухих компонентов. Оценка изменчивости показателя прочности при использовании инкапсулированного модификатора осуществлялась на следующие сутки после изготовления образцов, а также на 7-е, 14-е и 21-е сут. При этом после каждого определения предела прочности при сжатии при температуре 20°C испытываемые образцы хранились в нормальных условиях для обеспечения этапа восстановления.

Результаты определения предела прочности при четырех последовательных циклах испытаний при сжатии и периодах восстановления термопластичного композита с различным содержанием инкапсули-

рованного модификатора на основе органического восстановителя представлены в табл. 7.

Эффект восстановления при применении инкапсулированного модификатора обуславливается частичным восстановлением количества структурных связей, которые обеспечивают способность структуры сопротивляться большим нагрузкам, чем до процесса восстановления. С применением инкапсулированного модификатора на основе органического вяжущего за период восстановления показатель прочности больше, чем у контрольных образцов термопластичного композита. Это объясняется механизмом действия органического восстановителя, который после высвобождения из капсул диффундирует в битумную матрицу, растворяется в ней, снижая хрупкость и увеличивая подвижность молекул вяжущего, что способствует снижению поверхностного натяжения на границе трещины и ее залечиванию. В результате этого процесса количество связей в композите за счет новых, сформированных в результате самопроизвольного спутывания длинных цепей молекул, увеличивается, что способствует большей сопротивляемости к нагрузкам. При этом при увеличении содержания капсул с органическим восстановителем наблюдается уменьшение прочности, что может быть связано с недостаточным положительным эффектом омоложения вяжущего для компенсации негативного эффекта от капсул в структуре композита.

Для термопластичных композитов при использовании инкапсулированного модификатора на основе AR-полимера за период восстановления показатель прочности больше, чем у контрольных образцов термопластичного композита без капсул. Механизм действия восстановителя на основе полимера заключается в смачивании поверхности дефекта, частичной диффузии внутрь матрицы, полимеризации и «склеивании» трещины. При этом изменение прочности термопластичного композита от содержания инкапсулированного модификатора имеет экстремальную зависимость. Это обуславливается недостатком восстановителя для смачивания поверхности дефекта и «склеивания» его при небольших концентрациях. С увеличением содержания капсул количество AR-полимера, «склеивающего» дефект, возрастает, так же как и количество новых структурных связей. Дальнейшее увеличение содержания капсул приводит к снижению эффективности, так как над положительным эффектом от «склеивания» начинает преобладать негативный эффект от капсул в структуре композита.

Для оценки восстановительного эффекта в основном используется индекс, отражающий относительное изменение показателя прочности после восстановления [6, 31–33]:

$$HI = \frac{R_h}{R_0} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где HI – индекс восстановления; R_h – показатель прочности после действия восстановителя; R_0 – показатель прочности до действия восстановителя. Результаты расчета представлены на рис. 8.

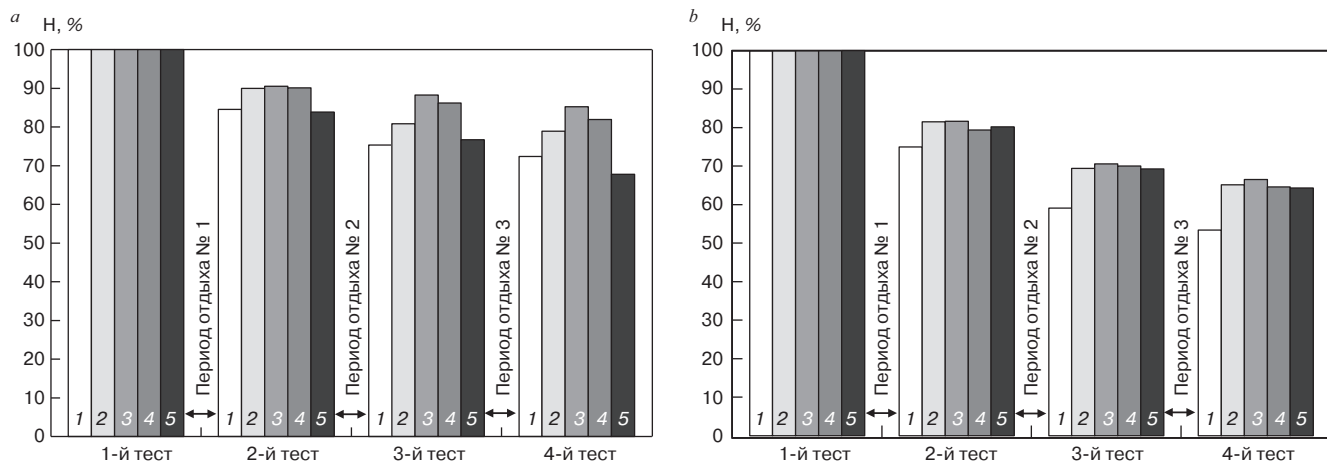


Рис. 8. Изменение прочности ЦМА после повторных испытаний при сжатии с различным содержанием капсул на основе подсолнечного масла (а) и АR-полимера (б): 1 – без капсул; 2 – 1,5%; 3 – 3%; 4 – 4,5%; 5 – 9%

Fig. 8. Changes in the strength of a thermoplastic composite after repeated compression tests with different contents of capsules based on an organic reducing agent (a) and AR-polymer (a): 1 – without capsules; 2 – 1.5%; 3 – 3%; 4 – 4.5%; 5 – 9%

Результаты анализа рис. 8 показывают, что увеличение в составе термопластичного композита количества капсул, содержащих органический восстановитель и АR-полимер, приводит к закономерному снижению показателя прочности. Это объясняется увеличением в объеме материала доли структурных элементов, обладающих меньшей прочностью, чем минеральные компоненты. Кроме того, такие капсулы могут рассматриваться как дополнительные дефекты структуры (до реализации их функционального использования), что идентично снижению концентрации структурных связей в материале. Согласно уравнению Ребиндера уменьшение структурных связей N_{st} при увеличении количества дефектов v_p (v_p – объемная доля дефектов) будет равно:

$$\Delta N_{st} = B_0 \Delta v_p, \quad (8)$$

где $B_0 = \sqrt[m]{R_0/\gamma f_c}$; R_0 – константа материала – прочность бездефектного материала; γ – константа; f_c – прочность единичной связи; m – показатель степени, характеризующий влияние концентрации связей на прочность материала (в уравнении Ребиндера $m=2/3$; в ряде исследований [24, 25] показано, что $m>2$).

Отсюда при равенстве $\Delta v_p = v_k$ (v_k – объемная доля капсул) негативное влияние капсул на прочность материала очевидна.

При этом влияние содержания капсул на прочность асфальтобетона на битуме и на комплексном вяжущем различно. Так, снижение прочности асфальтобетона на комплексном вяжущем при максимальной концентрации инкапсулированного модификатора в 1,9 раза меньше, чем для асфальтобетона на основе битума. Это обусловлено формированием более прочных структурных связей в композите с модифицированным битумным вяжущим, чем с битумом, и начальная прочность (R_0) на 36 % больше.

Общая потеря прочности после четырех тестов на сжатие для композитов на битумном вяжущем составила 47%, а для композита на основе комплексного

вяжущего – 38%, что свидетельствует о большей стойкости структуры к повторным механическим воздействиям. При этом отмечается, что после каждого теста по определению предела прочности при сжатии образцы композита обладают остаточной прочностью. Это объясняется тем, что в момент до испытания совокупность связей обеспечивает стойкость композита к критическим нагрузкам, которая является предельно допустимым значением давления, определяемым во время теста. При этом в процессе нагружения часть структурных связей разрушается, а часть после снятия нагрузки обеспечивает состояние структуры, которое характеризуется остаточной прочностью.

Так, после четвертого теста по определению предела прочности при сжатии индекс восстановления для композитов с инкапсулированным модификатором на основе органического восстановителя изменяется от 68 до 64% при содержании от 1,5 до 13,5 %. Для термопластичного композита с содержанием инкапсулированного модификатора на основе АR-полимера 1,5; 3; 4,5; 9%; 13,5% индекс восстановления равен 79; 85; 82; 70; 68% соответственно. Данный индекс свидетельствует о достаточно высоком уровне восстановления прочности как при использовании инкапсулированного модификатора на основе органического восстановителя, так и на основе АR-полимера. Однако данный индекс не учитывает два показателя: остаточную прочность, которая обуславливается наличием неразрушенных в результате теста связей, и собственный потенциал вяжущего к восстановлению.

Более точным подходом для оценки восстановительного эффекта является учет изменения потери прочности термопластичного композита при использовании инкапсулированного модификатора, учитывая, что индекс потери прочности представляет собой величину, обратную индексу восстановления, который будет рассчитываться как $1 - R_t/R_0$. Таким образом, коэффициент восстановления, учитывающий относительную разницу потери прочности термопластичного композита с применением

инкапсулированного модификатора и без него, рассчитывается по следующей формуле:

$$k_h = \frac{IR'}{IR} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $IR' = 1 - R'_h/R'_0$ – индекс потери прочности термопластичного композита без капсул; $IR = 1 - R_h/R_0$ – индекс потери прочности термопластичного композита с инкапсулированным модификатором; R'_0 и R_0 – показатели прочности термопластичного композита до восстановления без капсул и с инкапсулированным модификатором соответственно, МПа; R'_h и R_h – показатели прочности термопластичного композита после восстановления без капсул и с инкапсулированным модификатором соответственно, МПа.

Результаты расчета коэффициента восстановления, учитывающего относительную разницу потери прочности термопластичного композита с применением инкапсулированного модификатора и без него, представлены на рис. 9.

Анализ зависимостей коэффициента восстановления от содержания инкапсулированного модификатора показывает, что при содержании 3% капсул степень восстановления является максимальной. Это обусловлено оптимальным содержанием в структуре композита, при котором негативный эффект от их присутствия в объеме материала минимален и восстановительный эффект не компенсируется. При оптимальном содержании капсул с органическим восстановителем коэффициент восстановления показывает, что при повторном сжатии общие потери прочности с учетом действия модификатора оказались меньше на 28%. Для композита с оптимальным содержанием инкапсулированного модификатора на основе AR-полимера коэффициент восстановления показывает, что общие потери прочности с учетом действия модификатора на 46% меньше. При этом эффективность восстановления с применением инкапсулированного модификатора на основе AR-полимера в 1,87 раза больше, чем при использовании инкапсулированного модификатора на основе органического восстановителя.

Таким образом, оптимальным содержанием инкапсулированного модификатора, обеспечивающим максимальный восстановительный эффект в термопластичных композитах для дорожного строительства, является 3%. Дальнейшие исследования термопластичных композитов для дорожного строительства с функцией самовосстановления проводились на составах с оптимальным содержанием инкапсулированного модификатора.

Для подтверждения полученных расчетных (рис. 10) и теоретических результатов образцы термопластичного композита с инкапсулированным модификатором исследовались с использованием метода рентгеновской томографии (рис. 11). Исследования проводились на томографе V|TOME|X M300, General Electric, с помощью которого «послойно» осуществлялось сканирование образца с дальнейшим преобразованием 2400 снимков сечения в 3D-модель.

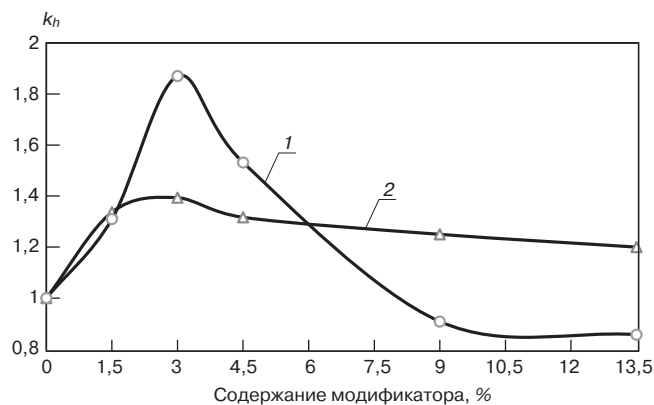


Рис. 9. Зависимость индекса восстановления k_h от содержания инкапсулированного модификатора: 1 – AR-полимер; 2 – подсолнечное масло

Fig. 9. Dependence of the reducing index k_h on the content of the encapsulated modifier: 1 – AR polymer; 2 – organic reducing agent

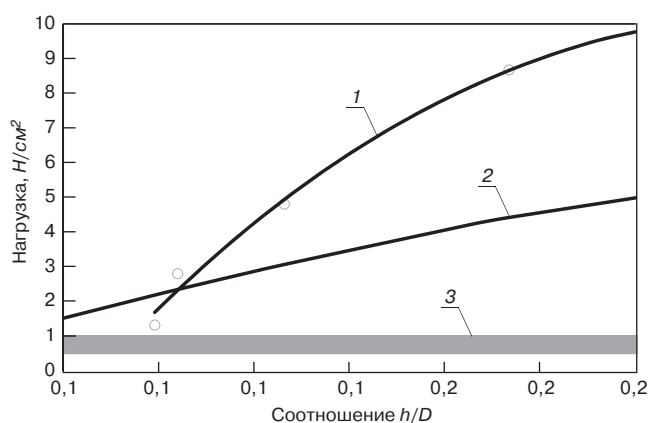


Рис. 10. Влияние соотношения h/D на показатели: 1 – фактическая прочность капсул; 2 – расчетное максимально допустимое давление при уплотнении смеси; 3 – зона фактической максимальной распределенной нагрузки при уплотнении смесей

Fig. 10. The influence of the ratio h/D on the indicators: 1 – the actual strength of the capsules; 2 – the estimated maximum allowable pressure when compacting the mixture; 3 – zone of the actual maximum distributed load when compacting mixtures

Результаты исследования образца до и после испытания на прочность представлены на рис. 12.

Анализ 3D-моделей, полученных с помощью томографии, показывает, что в большинстве своем капсулы после завершения процесса приготовления смеси и ее уплотнения остаются целостными (рис. 12, а).

После испытания образцов термопластичного композита наблюдается, что часть капсул была разрушена (рис. 12, б), так как в упругой матрице они являлись местом концентрации напряжений. Стоит отметить, что после испытаний в структуре термопластичного композита остается незначительная часть капсул, которые не были разрушены и потенциал их восстановливающего агента может быть дополнительно реализован при дальнейшем накоплении напряжений.

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о возможности получения композитов из термопластичной смеси, после приготовления и уплотнения которой капсулы с модификатором остаются целостными, а в период формирования напряжений в структуре и

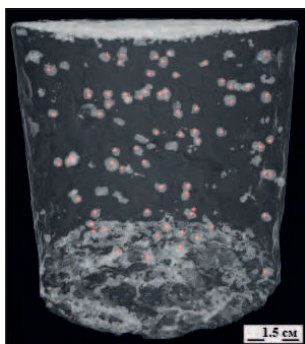


Рис. 11. 3D-визуализация томографических изображений образцов ЩМА с инкапсулированным модификатором

Fig. 11. 3D visualization of tomographic images of SMA samples with an encapsulated modifier

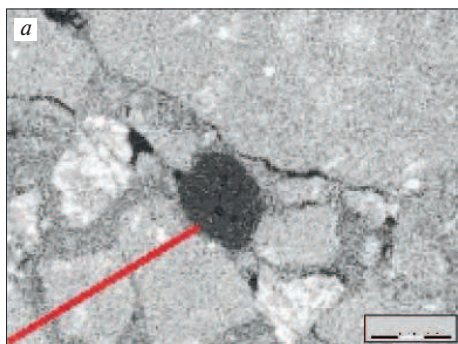
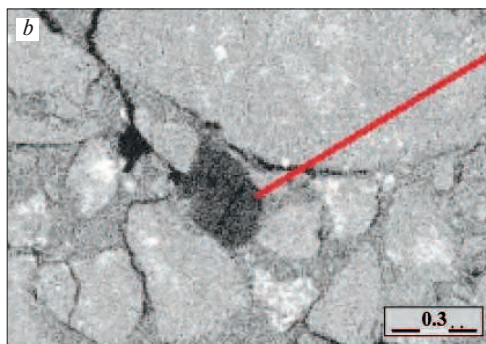


Рис. 12. Сравнительные томографические изображения образцов термопластичного композита с инкапсулированным модификатором до (а) и после испытаний на прочность (б)

Fig. 12. Comparative tomographic images of samples of a thermoplastic composite with an encapsulated modifier before (a) and after strength tests (b)



образования дефектов они способны разрушаться для высвобождения инкапсулированного модификатора.

Возможность создания капсул, содержащих модификатор для самовосстанавливающихся асфальтобетонов, обосновывается значительным отличием напряженных состояний в материале при воздействии нагрузок, возникающих на технологическом этапе в процессе приготовления асфальтобетонной смеси или ее уплотнения и в период эксплуатации асфальтобетона в дорожном покрытии. В асфальтобетонной смеси величина напряжений определяется дисперсностью минеральной части и геометрическими характеристиками капсул. В асфальтобетоне целостность капсул определяется способностью сопротивляться напряжениям, возникающим в композите, и зависит как от величины внутренних напряжений, которые увеличиваются в процессе эксплуатации, так и от геометрических характеристик капсул.

При оптимальном содержании капсул с органическим восстановителем коэффициент восстановления показывает, что при повторном сжатии общие потери прочности с учетом действия модификатора оказались меньше на 28%. Для композита с оптимальным содержанием инкапсулированного модификатора на основе AR-полимера коэффициент восстановления показывает, что общие потери прочности с учетом действия модификатора на 46% меньше. При этом эффективность восстановления с применением инкапсулированного модификатора на основе AR-полимера в 1,87 раза больше, чем при использовании инкапсулированного модификатора на основе органического восстановителя.

Список литературы / References

1. Canestrari F., Ingrassia L.P. A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020. Vol. 7. Iss. 5, pp. 541–572. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.08.002
2. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Increasing the weathering resistance of asphalt by nanomodification.

Materials science forum. 2009. Vol. 945, pp. 147–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.147

3. Partl M.N. Introduction. In: Partl M., Porot L., Di Benedetto H., Canestrari F., Marsac P., Tebaldi G. (eds) Testing and characterization of sustainable innovative bituminous materials and systems. *RILEM State-of-the-Art Reports*. 2018. Vol. 24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71023-5_1
4. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040, pp. 80–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.80
5. Liang B., Lan F., Shi K., Qian G., Liu Zh., Zheng J. Review on the self-healing of asphalt materials: Mechanism, affecting factors, assessments and improvements. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 266. Part A. 120453. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120453
6. Inozemtcev S., Korolev E. Review of road materials self-healing: problems and perspective. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 855. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/855/1/012010
7. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 135, pp. 641–649. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165
8. Королев Е.В., Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Самошин А.П., Иноземцев С.С. Обоснование выбора способа наномодифицирования асфальтобетонных смесей. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012. № 4. С. 40–43.
8. Korolev E.V., Tarasov R.V., Makarova L.V., Samoshin A.P., Inozemtsev S.S. Substantiation of the choice of the method of nanomodification of asphalt concrete mixtures. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2012. No. 4, pp. 40–43. (In Russian).
9. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Active polymeric reducing agent for self-healing asphalt concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1030 (1). 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012002

10. Qui J., M.F.C. van de Ven, Wu S., Molenaar A.A.A. Investigation the self healing capability of bituminous binders. *Road Materials Pavement Design*. 2009. Vol. 10. Iss. 1, pp. 81–94. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690237
11. Su J.F., Schlangen E., Qiu J. Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Powder technology*. 2013. Vol. 235, pp. 563–571. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.11.013
12. Inozemtcev S., Trong T.D., Korolev E. Thermal and mechanical properties of calcium alginate capsules for self-healing asphalt concrete. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1041 MSF, pp. 101–106. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1041.101
13. Bueno M., Kakar M.R., Refaa Z., Wortlitschek J., Stamatiou A., Partl M.N. Modification of asphalt mixtures for cold regions using microencapsulated phase change materials. *Nature Research: Sci Rep* 9. 2019. 20342. DOI: 10.1038/s41598-019-56808-x
14. Bekele A., Ryden N., Gudmarsson A., Birgisson B. Effect of Cyclic low temperature conditioning on Stiffness Modulus of Asphalt Concrete based on Non-contact Resonance testing method. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 225, pp. 502–509. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.194
15. Энциклопедия полимеров. Ред. коллегия: В.А. Каргин (гл. ред.) и др. Т. 1. А–К. М.: Советская Энциклопедия, 1972. 1224 с.
15. Encyclopedia of polymers. Ed. collegium: V.A. Kargin (editor-in-chief). Vol. 1 A–K. Moscow: Soviet Encyclopedia. 1972. 1224 p.
16. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Sodium alginate emulsions for asphalt concrete modifiers encapsulating: structural rheological properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 1 (101). 10104. DOI: 10.34910/MCE.101.4
17. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251.01008. DOI: 10.1051/mateconf/201825101008
18. Su J.F., Schlangen E., Qiu J. Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Powder technology*. 2013. Vol. 235, pp. 563–571. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2012.11.013
19. Barrasa R.C., López V.B., Montoliu C.M.P., Ibáñez V.C., Pedrajac J., Santaren J. Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 162, pp. 188–197. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.199
20. Su J.F., Schlangen E. Synthesis and physicochemical properties of novel high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 198–199, pp. 289–300. DOI: 10.1016/J.CEJ.2012.05.094
21. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 135, pp. 641–649. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.12.165
22. Al-Mansoori T., Micaloabc R., Artamendid I., Norambuena-Contrerasae J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 155, pp. 1091–1100. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.08.137
23. Inozemtcev S., Korolev E. Surface modification of mineral filler using nanoparticles for asphalt application. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 196 (10). 04052. DOI: 10.1051/MATECCONF/201819604052
24. Inozemtcev, S.S., Korolev, E.V., Smirnov, V.A. Nanomodified bitumen composites: Solvation shells and rheology. *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 83, pp. 393–397. DOI: DOI:10.1201/B19693-85
25. Riccardi C., Cannone Falchetto A., Losa M., Wistuba M. Modeling of the rheological properties of asphalt binder and asphalt mortar containing recycled asphalt material. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14, pp. 3503–3511. DOI: 10.1617/S11527-015-0779-Z
26. Raheb M., Pär J., Sotirios G. Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 158, pp. 774–785. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068
27. Daintith J. A Dictionary of Physics (6 ed.). Oxford University Press. 2009. 624 p. DOI: 10.1007/978-1-349-66022-3
28. Окопный Ю.А., Радин В.П., Чирков В.П. Механика материалов и конструкций. М.: Машиностроение, 2001. 408 с.
28. Okopny Yu.A., Radin V.P., Chirkov V.P. Mekhanika materialov i konstruksiy [Mechanics of materials and structures]. Moscow: Mashinostroenie. 2001. 408 p.
29. Bhasin A., Palvadi S., Little D. Influence of aging and temperature on intrinsic healing of asphalt binders. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2011. Vol. 2207. Iss. 1, pp. 70–78. DOI: 10.3141/2207-10
30. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Т. 2. М.: Наука, 1990. 591 с.
31. Sivukhin D.V. Obshchiy kurs fiziki. Termodinamika i molekulyarnaya fizika. Tom II [General course of physics. Thermodynamics and molecular physics. Vol. II]. Moscow: Nauka. 1990. 591 p.
31. Xu S., Tabaković A., Liu X., Palin D., Schlangen E. Optimization of the calcium alginate capsules for self-healing asphalt. *Materials*. 2019. Vol. 12. Iss. 1. 168. DOI: 10.3390/APP9030468
32. Qiu J., Wu S., Molenaar A.A.A. Investigating the self healing capability of bituminous binders. *Road Materials and Pavement Design*. 2009. Vol. 10, pp. 81–94. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690237
33. Tabaković A., Schuyffel L., Karač A., Schlangen E. An evaluation of the efficiency of compartmented alginate fibres encapsulating a rejuvenator as an asphalt pavement healing system. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. Iss. 7. 647. DOI: 10.3390/APP7070647

А.Ф. ГАЛКИН¹, д-р техн. наук, профессор (afgalkkin@mail.ru);
В.Ю. ПАНКОВ², канд. геол.-минер. наук, доцент (pankov1956@gmail.ru),
Е.О. ЖИРКОВА² (coluwka@mail.ru)

¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36)

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (677027, г. Якутск, ул. Белинского, 58)

Расчет термического сопротивления дорожной одежды

Тепловые расчеты для обоснования технических решений при проектировании автомобильных дорог в криолитозоне базируются на определении и выборе заданного термического сопротивления конструктивных слоев дорожной одежды. Целью настоящих исследований являлась количественная оценка возможности использования при расчетах термического сопротивления эквивалентной однослойной (вместо многослойной) конструкции дорожной одежды. Для анализа использовались классические формулы стационарной теплопередачи через плоскую стенку. Получены простые инженерные формулы для оценки относительной процентной ошибки значений термического сопротивления при использовании в расчетах эквивалентного слоя дорожной одежды. В качестве примера рассмотрена двухслойная конструкция дорожной одежды. Введено понятие коэффициента неравенства теплопроводности материалов конструктивных слоев дорожной одежды. Показано, что для достижения ошибки в расчетах меньше допустимой в инженерной практике коэффициент неравенства не должен быть меньше значения 0,52 и больше значения 1,92. Построена и исследована целевая функция допустимой расчетной ошибки на минимум. Результаты численных расчетов представлены в виде 2D- и 3D-графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние диапазона изменения значений коэффициентов теплопроводности материалов конструктивных слоев на правомерность использования эквивалентной однослойной конструкции дорожной одежды при расчетах термического сопротивления.

Ключевые слова: автомобильная дорога, многолетняя мерзлота, тепловой режим, прогноз, коэффициент теплопроводности, дорожная одежда, термическое сопротивление, эквивалентный слой, ошибка расчета.

Для цитирования: Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Жиркова Е.О. Расчет термического сопротивления дорожной одежды // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-70-75>

A.F. GALKIN¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (afgalkkin@mail.ru);

V.Yu. PANKOV², Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Docent (pankov1956@gmail.ru),

E.O. ZHIRKOVA² (coluwka@mail.ru)

¹ Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (36, Merzlotnaya Street, Yakutsk, 677010, Russian Federation)

² North-Eastern Federal University (58, Belinskogo Street, Yakutsk, 677027, Russian Federation)

Calculation of Thermal Resistance of Pavement

Thermal calculations to substantiate technical solutions in the design of highways in the cryolithozone are based on the determination and selection of a set thermal resistance of the structural layers of the pavement. The purpose of this study was to quantify the possibility of using an equivalent single-layer (instead of multi-layer) pavement structure in thermal resistance calculations. The classical formulas for stationary heat transfer through a flat wall were used for the analysis. Simple engineering formulas have been obtained for estimating the relative percentage error of thermal resistance values when using the equivalent pavement layer in calculations. As an example, the two-layer construction of the pavement is considered. The concept of the coefficient of inequality of thermal conductivity of materials of structural layers of pavement is introduced. It is shown that in order to achieve an error in the calculations less than acceptable in engineering practice, the inequality coefficient should not be less than the value of 0.52 and greater than the value of 1.92. The objective function of the permissible calculation error for the minimum is constructed and investigated. The results of numerical calculations are presented in the form of 2D and 3D graphs, which make it possible to visually assess the influence of the range of changes in the values of the thermal conductivity coefficients of materials of structural layers on the validity of using an equivalent single-layer pavement structure in thermal resistance calculations.

Keywords: automobile road, permafrost, thermal regime, forecast, thermal conductivity coefficient, road pavement, thermal resistance, equivalent layer, calculation error.

For citation: Galkin A.F., Pankov V.Yu., Zhirkova E.O. Calculation of thermal resistance of pavement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 70–75. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-70-75>

Строительство и эксплуатация автомобильных дорог в криолитозоне сопряжены с рядом трудностей, которые определяются как геокриологическими и климатическими условиями региона, так и сложностью прогноза теплового режима дорожных одежд и оснований при проектировании и выборе эффективных технических решений. Это вызвано как существенным изменением теплофизических и прочностных свойств мерзлых грунтов в течение годового цикла [1–3], так и отсутствием универсальных методов предотвращения воздействия негативных криогенных процессов на дорожное полотно в

период эксплуатации [4–6]. Такие криогенные процессы, как наледообразование, пучение, морозобойное растрескивание дорожных одежд и оснований, являются основными негативными факторами, резко снижающими периоды безремонтной эксплуатации дорог и зачастую приводящими к аварийным ситуациям [7–11]. Поэтому важно уже на стадии проектирования определить степень воздействия криогенных процессов на дорожные одежды и основания, обосновать технические решения и разработать превентивные меры по минимизации их негативного влияния на надежность эксплуатации дорог

в различных климатических зонах. Одним из важных теплофизических параметров, определяющих интенсивность протекания тепловых процессов в конструктивных слоях дорожных одежд и оснований, является термическое сопротивление дорожной одежды [12–14]. Многие тепловые расчеты, выполняемые для обоснования технических решений при проектировании автомобильных дорог в криолитозоне, базируются на определении и выборе заданного термического сопротивления конструктивных слоев дорожной одежды. Этот показатель определяет, например, такие важные при проектировании дорог проектные характеристики, как глубина оттаивания и скорость промерзания дорожного основания. Зачастую именно эти характеристики наряду с физико-механическими свойствами грунтов и материалов, используемых в дорожных одеждах, определяют эффективность технических решений на практике, которые обеспечивают необходимый уровень надежности и безопасности эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне.

Целью настоящих исследований являлась количественная оценка возможности замены слоистой конструкции дорожной одежды эквивалентной однослойной конструкцией со средним коэффициентом теплопроводности при расчете термического сопротивления.

Методы исследований

Используя классические подходы к определению понятия термического сопротивления слоистой плоской одномерной конструкции [15, 16], расчетные формулы для нахождения значения термического сопротивления R дорожной одежды толщиной δ_0 , состоящей из n слоев материалов толщиной δ_i с различным коэффициентом теплопроводности λ_i , можно записать в следующем виде. Для разнородной слоистой конструкции:

$$R_1 = \sum_{i=1}^n (\delta_i / \lambda_i). \quad (1)$$

Для эквивалентной однослойной конструкции со средним значением коэффициента теплопроводности:

$$R_2 = n (\sum_{i=1}^n \delta_i) / (\sum_{i=1}^n \lambda_i). \quad (2)$$

Коэффициент теплопроводности строительного материала обычно определяется экспериментально или может быть определен расчетным путем с использованием известных зависимостей [17–19], которые, как показал количественный анализ, выполненный в работе [20], дают близкие результаты, достаточные для практических целей.

Относительная расчетная ошибка термического сопротивления, которая возникает при замене многослойной конструкции дорожной одежды эквивалентной однослойной, будет равна:

$$\varepsilon = (R_1 - R_2) / R_1 = (1 - R_2 / R_1). \quad (3)$$

Здесь параметр R_2 / R_1 , используя уравнения (1) и (2), может быть определен по формуле:

$$\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{n \delta_0}{(\sum_{i=1}^n \lambda_i) (\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i)}. \quad (4)$$

Рассмотрим для примера простую двухслойную конструкцию дорожной одежды. В этом случае выражение (4) преобразуется к виду:

$$\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{2 \delta_0 \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \lambda_2) (\delta_2 \lambda_1 + \delta_1 \lambda_2)}. \quad (5)$$

Допустим, что слои имеют одинаковую толщину, т. е. $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0 / 2$. В этом случае формула (5) запишется в следующем виде:

$$\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{4 \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \lambda_2)^2}. \quad (6)$$

Допускаемую процентную ошибку расчета термического сопротивления при замене двухслойной конструкции эквивалентной однослойной конструкцией с учетом формулы (3) найдем из выражения:

$$e = \left(1 - \frac{4 \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \lambda_2)^2}\right) \cdot 100\%. \quad (7)$$

Введем параметр k , характеризующий степень неравенства коэффициентов теплопроводности материалов отдельных слоев, т. е. $\lambda_1 = k \lambda_2$. В этом случае формула (7) преобразуется к следующему виду:

$$e = \left(1 - \frac{4k}{(1+k)^2}\right). \quad (8)$$

Обычно в инженерной практике при расчетах проектных величин считается допустимой ошибка, не превышающая 10%, т. е. $e \leq 10\%$, или $e \leq 0,1$. Подставляя данное значение в выражение (8), можно определить, при каком значении коэффициента неравенства k замена слоистой конструкции эквивалентной однослойной конструкцией не приведет к ошибке при расчете термического сопротивления больше допустимой. После несложных преобразований приходим к обыкновенному квадратичному уравнению относительно параметра k :

$$k^2 + 2k + 1 = 4k/0,9 \text{ или } k^2 + 2,44k + 1 = 0, \quad (9)$$

решение которого имеет два вещественных корня:

$$k = (2,44 + (-)1,41)/2 \text{ или } k = 1,92 \text{ и } k = 0,52. \quad (10)$$

Таким образом, можно утверждать, что в расчетах термического сопротивления не будет ошибки больше допустимой ($e \leq 10\%$), если коэффициент неравенства находится в интервале $0,52 \leq k \leq 1,92$.

С теоретической и практической точки зрения представляет интерес поиск минимального значения коэффициента неравенства теплопроводности материалов отдельных слоев дорожной одежды. Для нахождения этого значения параметра k , исследуем функцию (9) на минимум. Найдем, при каком значе-

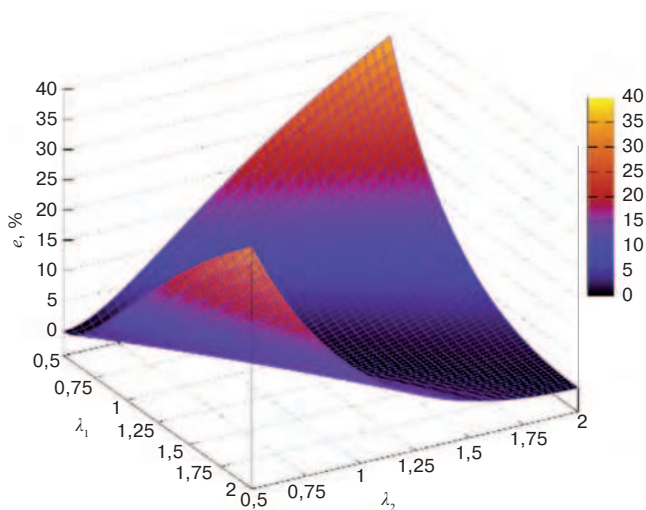


Рис. 1. Ошибка в расчете термического сопротивления при использовании эквивалентного слоя вместо двухслойной дорожной одежды равной толщины из материалов с коэффициентами теплопроводности λ_1 и λ_2

Fig. 1. Error in the calculation of thermal resistance when using an equivalent layer instead of a two-layer pavement of equal thickness made of materials with thermal conductivity coefficients λ_1 and λ_2

нии k ошибка усреднения будет минимальна. В математическом плане это соответствует следующей записи:

$$\frac{de}{dk} = 0 \text{ при } e = \min. \quad (11)$$

Из данного выражения, используя формулу (9), после дифференцирования приходим к простому алгебраическому уравнению:

$$[(k + 1)^2 - 2(k + 1)] / (k + 1)^4 = 0, \quad (12)$$

из которого следует, что условие $e = \min$ выполняется при значении $k = 1$.

Это было ясно из простых физических соображений и следует из постановки задачи. Ведь значение $k = 1$ соответствует равенству коэффициентов теплопроводности первого и второго слоев дорожной одежды. Очевидно, что при разбиении однородного слоя на два слоя равной толщины никакой ошибки при расчетах термического сопротивления дорожной одежды не возникает. Исследование целевой функции на минимум количественно подтвердило логическое утверждение.

Результаты и обсуждение

Для достижения цели по приведенным ранее формулам были проведены варианты расчетов, результаты которых представлены в виде 2D- и 3D-графиков на рис. 1–4. На рис. 1 представлена зависимость относительной процентной ошибки, вычисленной по формуле (7), в расчете термического сопротивления при использовании эквивалентного слоя вместо двухслойной дорожной одежды одина-

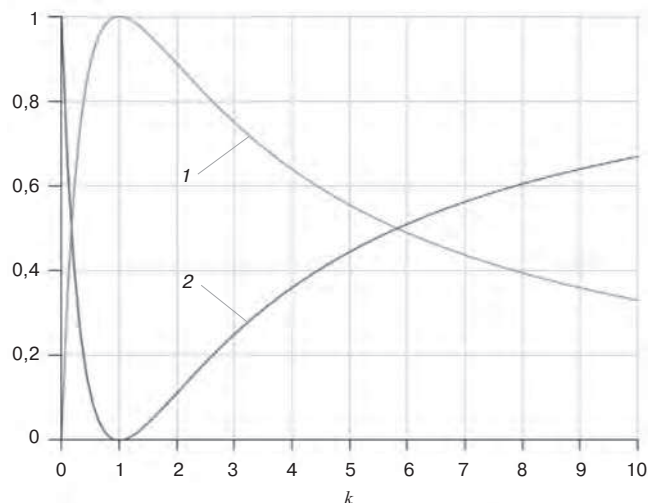


Рис. 2. Изменение параметров, определенных по формулам (6) – 1 и (8) – 2, для двухслойной конструкции в зависимости от значения коэффициента неравенства k

Fig. 2. Changing the parameters defined by the formulas (6) – 1 and (8) – 2 for a two-layer design depending on the value of the inequality coefficient k

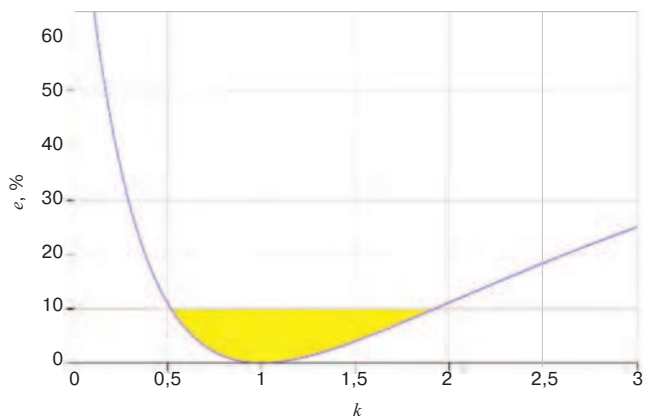


Рис. 3. Ошибка, возникающая при определении термического сопротивления дорожной одежды в зависимости от значения коэффициента неравенства k

Fig. 3. An error that occurs when determining the thermal resistance of road pavement, depending on the value of the coefficient of inequality k

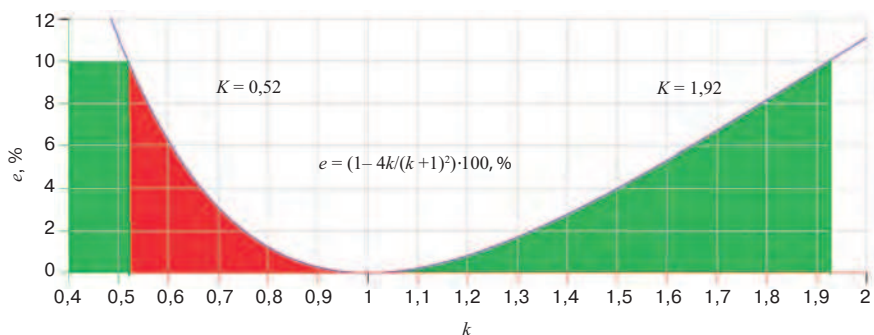


Рис. 4. Область допустимого изменения коэффициента неравенства k для инженерных расчетов

Fig. 4. Area of permissible change in the coefficient of inequality k for engineering calculations

ковой толщины из материалов с коэффициентами теплопроводности λ_1 и λ_2 , Вт/(м·К).

Как следует из данных рис. 1, существует область, в которой ошибка минимальна. Величина ошибки напрямую связана со степенью отклонения значений коэффициента теплопроводности материалов отдель-

ных слоев друг от друга. Например, при отношении коэффициентов теплопроводности, равном 4, ошибка составляет 36%. При уменьшении отношения в три раза ошибка уменьшается до 11%. Аналогичная количественная зависимость наблюдается и в диапазоне колебаний степени отклонения меньше единицы. Правда, качественно эта зависимость другая. При уменьшении соотношения коэффициентов теплопроводности процентная ошибка не уменьшается, а возрастает. Характер кривых, представленных на рис. 2, подтверждает эти закономерности.

Из графиков рис. 2 видно, что с увеличением значения коэффициента неравенства k относительная ошибка вычисления (кривая 2 на графике) резко снижается в диапазоне 0–1 и затем плавно повышается при значениях больше единицы. Соответственно кривая 1 является зеркальным отражением кривой 2 и характеризует изменение второго члена в уравнении (8). В области значений коэффициента неравномерности k больше единицы кривые пологие и градиент изменения расчетных величин, характеризующих допускаемую ошибку вычисления термического сопротивления, значительно меньше. На рис. 3 представлена кривая, характеризующая изменение ошибки, возникающая при определении термического сопротивления дорожной одежды, в зависимости от значения коэффициента неравенства k .

Желтым цветом на рис. 3 обозначена область допустимых в инженерной практике ошибок вычисления искомых величин ($e \leq 10\%$). Как видно из графиков, эта область достаточна мала. Но, учитывая что диапазон изменения теплофизических свойств строительных материалов, используемых в конструктивных слоях дорожных одежд, также не очень велик (за исключением специальных теплозащитных слоев), имеет смысл определение предельных значений диапазона изменения коэффициента неравенства k , которое приведено в тесте ранее. На графике рис. 4 показана область изменения данного параметра, которая является допустимой для достижения заданной точности расчета термического сопротивления при использовании понятия эквивалентного слоя.

Красным цветом в левой части рисунка и зеленым в правой части рисунка выделены области изменения параметра, характеризующего степень неравенства в коэффициентах теплопроводности отдельных слоев дорожной одежды k , при которых переход к эквивалентному слою дорожной одежды не вызовет ошибки больше допустимой в инженерной практике.

Заключение

Получены простые инженерные зависимости для определения ошибки, возникающей при расчете термического сопротивления дорожной одежды путем замены слоистой конструкции на эквивалентную однослойную со средним коэффициентом теплопроводности. Для наглядности использован простой пример расчета термического сопротивления двухслойной конструкции дорожной одежды. Введено понятие коэффициента неравенства теплопроводности материалов конструктивных слоев дорожной одежды. Показано, что для достижения ошибки в расчетах меньше допустимой в инженерной практике коэффициент неравенства не должен быть меньше значения 0,52 и больше значения 1,92. Получена и исследована на наличие минимума целевая функция допустимой расчетной ошибки. Установлено, что для двухслойной конструкции дорожной одежды величина ошибки при расчете термического сопротивления напрямую связана со степенью отклонения значений коэффициента теплопроводности материалов отдельных слоев друг от друга. Например, при отношении коэффициентов теплопроводности, равном 4, ошибка составляет почти 36%. Результаты численных расчетов представлены в виде 2D- и 3D-графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние диапазона изменения значений коэффициентов теплопроводности материалов конструктивных слоев на правомерность использования эквивалентной однослойной конструкции дорожной одежды при расчетах термического сопротивления. Результаты проведенного исследования могут быть полезны как инженерам-проектировщикам дорожной отрасли, так и научным работникам в области инженерной геокриологии и строительства инженерных сооружений в криолитозоне. В методическом плане данная работа может представлять интерес для аспирантов, обучающихся по различным специальностям направления 1.6 «Науки о Земле», а также студентам, обучающимся по специальности 08.02.05 «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и аэродромов». Дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку влияния принятой теоретической модели для расчета термического сопротивления дорожной одежды на конечный результат теплового расчета проектных величин, например на расчетную глубину оттаивания или промерзания дорожного основания.

Список литературы

1. Вялов С.С. Реологические основы механики мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
2. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Well drilling in permafrost regions: Dynamics of the thawed zone // *Polar Research*. 2019. Vol. 38. 3351. DOI: <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351>

References

1. Vyalov S.S. Rheologicheskie osnovy mekhanika mozlykh gruntov [Rheological foundations of frozen soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola. 1978. 447 p.
2. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Well drilling in permafrost regions: Dynamics of the thawed zone. *Polar*

3. Zhang X., Feng S.G., Chen P.C. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions // *Oil Gas Storage Transportation*. 2013. No. 6, pp. 365–369.
4. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal protection of roads in the permafrost zone // *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. No. 2, pp. 395–399. DOI: 10.5937/jaes0-34379
5. Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Шац М.М., Сивцев М.А. Численное моделирование изменения мерзлотных условий взлетно-посадочной полосы аэропорта Олекминск // *Маркшейдерия и недропользование*. 2021. № 5 (115). С. 22–32.
6. Панков В.Ю., Бурнашева С.Г. Анализ способов защиты автомобильных дорог от негативных криогенных процессов. В сб. *Лучшая студенческая статья 2020*. МЦНС «Наука и просвещение». 2020. С. 52–55.
7. Шац М.М. Современное состояние городской инфраструктуры г. Якутска и пути повышения ее надежности // *Геориск*. 2011. № 2. С. 40–46.
8. Сериков С.И., Шац М.М. Морозобойное растрескивание грунтов и его роль в состоянии поверхности и инфраструктуры г. Якутска // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2018. № 1. С. 56–69. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.04
9. Шестернев Д.М., Литовко А.В. Комплексные исследования по выявлению деформаций на автомобильной дороге «Амур». *Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»*. М.: Геомаркет, 2018. С. 309–314.
10. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне. *Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»*. М.: Геомаркет, 2018. С. 223–227.
11. Кондратьев В.Г., Кондратьев С.В. Как защитить федеральную автодорогу «Амур» Чита – Хабаровск от опасных инженерно-геокриологических процессов и явлений // *Инженерная геология*. 2013. № 5. С. 40–47.
12. Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю., Потопов А.В. Оценка эффективности использования слоистой конструкции тепловой защиты при строительстве дорог в криолитозоне // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. № 4. С. 24–28.
13. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах // *Транспортное строительство*. 2022. № 1. С. 14–17. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-4-24-28
3. Zhang X., Feng S.G., Chen P.C. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions // *Oil Gas Storage Transportation*. 2013. No. 6, pp. 365–369.
4. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal protection of roads in the permafrost zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. No. 2, pp. 395–399. DOI: 10.5937/jaes0-34379
5. Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N., Shats M.M., Sivtsev M.A. Numerical modeling of changes in permafrost conditions of the airport Olekminsk. *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye*. 2021. No. 5 (115), pp. 22–32. (In Russian).
6. Pankov V.Yu., Burnasheva S.G. Analysis of ways to protect roads from negative cryogenic processes *In the collection: «The best student article 2020». ICNS «Science and Enlightenment»*. 2020, pp. 52–55. (In Russian).
7. Shats M.M. The current state of the urban infrastructure of Yakutsk and ways to improve its reliability. *Georisk*. 2011. No. 2, pp. 40–46. (In Russian).
8. Serikov S.I., Shats M.M. Frost cracking of soils and its role in the state of the surface and infrastructure of Yakutsk. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics*. 2018. No. 1, pp. 56–69. (In Russian). DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.04
9. Shesternev D.M., Litovko A.V. Comprehensive research on the identification of deformations on the Amur highway. *Materials of the reports of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition «Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation»*. Moscow: «Geomarke». 2018, pp. 309–314. (In Russian).
10. Zheleznyak M.N., Shesternev D.M., Litovko A.V. Problems of stability of roads in the cryolithozone. *Materials of the reports of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition «Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation»*. Moscow: «Geomarket». 2018, pp. 223–227. (In Russian).
11. Kondratyev V.G., Kondratyev S.V. How to protect the federal highway «Amur» Chita – Khabarovsk from dangerous engineering and geocryological processes and phenomena. *Engineering geology*. 2013. No. 5, pp. 40–47. (In Russian).
12. Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu., Potapov A.V. Evaluation of the effectiveness of the use of layered structures of thermal protection in the construction of roads in cryolithozone. *Energobezopasnost' i energosberezheniye*. 2020. No. 4, pp. 24–28. (In Russian).
13. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. Analysis of constructive solutions depending on the type of insulating materials in road surfaces in permafrostnye soils. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2022. No. 1, pp. 14–17. (In Russian). DOI: 10.18635/2071-2219-2020-4-24-28

14. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Повышение тепловой устойчивости дорожных одежд в криолитозоне // Строительные материалы. 2021. № 7. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>
15. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
16. Галкин А.Ф. Термическое сопротивление теплозащитного слоя дорожной одежды // Естественные и технические науки. 2021. № 8. С. 97–99.
17. Дульнев Г.И. Теплопроводность влажных пористых материалов // ИТЖ. 1989. Т. 56. № 2. С. 261–291.
18. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Журнал технической физики. 1951. Т. 21. Вып. 6. С. 667–685.
19. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
20. Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Calculation of thermal conductivity coefficient of thermal insulation mixtures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 918. 012009. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012009
14. Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Increasing the thermal stability of the embankment in permafrost regions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 7, pp. 26–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>
15. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat. 1981. 416 p.
16. Galkin A.F. Thermal resistance of the heat-shielding layer of road clothing // *Natural and technical sciences*. 2021. №8, pp.97–99. (In Russian)
17. Dulnev G.I. Thermal conductivity of wet porous materials. *ITZH*. 1989. Vol. 56. No. 2, pp. 261–291. (In Russian).
18. Odelevsky V.I. Calculation of generalized conductivity of heterogeneous systems. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1951. Vol. 21. No. 6, pp. 667–685. (In Russian).
19. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad: Energiya. 1974. 264 p.
20. Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Calculation of thermal conductivity coefficient of thermal insulation mixtures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 918. 012009. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012009

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести книги:

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.

**Монография «Производство деревянных клееных конструкций»**

Автор – заслуженный деятель науки России, д-р техн. наук Ковальчук Л.М.

В книге рассмотрены основные вопросы технологии изготовления ДКК, показаны области их применения, описаны материалы для их изготовления. Особое внимание уделено вопросам оценки качества, методам испытаний, приемке и сертификации клееных конструкций. В книге приведен полный перечень отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих производство и применение ДКК.



**Заявки направляйте в редакцию по e-mail: mail@rifsm.ru,
по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36.**

Оформляйте заказ на сайте www.rifsm.ru

Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, д-р физ.-мат. наук (MatseevichTA@mgsu.ru);
А.А. АСКАДСКИЙ^{1,2}, д-р хим. наук (andrey@ineos.ac.ru);
С.А. МЕРКУЛОВ¹, магистрант (imerkulov@yandex.ru)

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

² Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28)

Прогнозирование коэффициента оптической чувствительности по напряжению многослойных полимерных материалов

Изложен способ прогнозирования коэффициента оптической чувствительности по напряжению многослойных полимерных материалов. Прогноз осуществляется на основе химического строения полимерных слоев. Все анализы проведены для сетчатых полимеров на основе отвержденной циклоалифатической эпоксидной смолы, а также на основе полиизоциануратов, состоящих из продуктов остатка 2,4-толуилеандиизоцианатов и гликолей различного химического строения. Наибольший коэффициент достигает 192 Брюстера, а наименьший коэффициент равен 97 Брюстера. Таким образом, коэффициент оптической чувствительности всегда остается высоким для рассмотренных в статье трехслойных сетчатых полимеров. Эти полимеры могут найти применение в методе фотоупругости для построения моделей натуральных строительных конструкций.

Ключевые слова: коэффициент оптической чувствительности по напряжению, метод фотоупругости, сетчатые полимеры, циклоалифатическая эпоксидная смола, полиизоцианураты.

Испытания проводились на исследовательском оборудовании Головного регионального центра коллективного пользования научным оборудованием и установками НИУ МГСУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007 (МГСУ) и тема госзадания ИНЭОС РАН № 0085-2019-0004).

Для цитирования: Мацеевич Т.А., Аскадский А.А., Меркулов С.А. Прогнозирование коэффициента оптической чувствительности по напряжению многослойных полимерных материалов // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 76–80.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-76-80>

T.A. MATSEEVICH¹, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics) (MatseevichTA@mgsu.ru);

A.A. ASKADSKII^{1,2}, Doctor of Sciences (Chemistry) (andrey@ineos.ac.ru); S.A. MERKULOV¹, Undergraduate (imerkulov@yandex.ru)

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

² A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)

(28, Vavilova Street, Moscow, 119991, Russian Federation)

Prediction of the Stress-Optical Coefficient of Multilayer Polymer Materials

A method for predicting the stress-optical coefficient of multilayer polymeric materials is described. The prediction is based on the chemical structure of the polymer layers. All analyzes were carried out for network polymers based on cured cycloaliphatic epoxy resin, as well as on the basis of polyisocyanurates, consisting of products of the chemical interaction of 2,4-toluenediisocyanates and glycols of various chemical structures. The highest coefficient reaches 192 Brewster and the smallest coefficient is 97 Brewster. Thus, the stress-optical coefficient always remains high for the three-layer network polymers considered in the article. These polymers can be used in the photo-elasticity method for building models of full-scale building structures.

Keywords: stress-optical coefficient, photo-elasticity method, network polymers, cycloaliphatic epoxy resin, polyisocyanurates.

Research were carried out using research equipment of The Head Regional Shared Research Facilities of the Moscow State University of Civil Engineering.

The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project “Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety in the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats” No. FSWG-2020-0007 (MSTU) and the topic of the State task of INEOS RAS No. 0085-2019-0004).

For citation: Matseevich T.A., Askadskii A.A., Merkulov S.A., Forecasting the stress-optical coefficient of multilayer polymeric materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 76–80. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-76-80>

В настоящее время полимерные материалы широко используются при построении моделей натуральных конструкций для применения в методе фотоупругости, с помощью которого анализируется распределение напряжений и деформаций. В этом методе основополагающими являются коэффициенты оптической чувствительности по напряжению, представляющие собой коэффициенты пропорциональности между механическим напряжением и величиной двойного лучепреломления, которое возникает в по-

лимерных стеклах при приложении механической нагрузки. Метод фотоупругости широко применялся в Московском государственном строительном университете, где была создана лаборатория исследования напряжений (руководитель Г.Л. Хесин). Оптически чувствительные полимерные материалы и их свойства описаны в сборнике [1]. Рассмотрим ряд более современных работ.

В работе [2] измеряли коэффициент оптической чувствительности для ряда волокон, изготовленных из

полиметилметакрилата (ПММА). Изучали влияние вытяжки при действии напряжения в интервале 2–27 МПа. Также изучали влияние температуры отжига на величину C_{σ} . В результате было показано, что для волокон из ПММА величина C_{σ} имеет отрицательный знак и находится в интервале -4,5 – -1,5 Брюстер. Увеличение напряжения волочения приводит к большему начальному двулучепреломлению волокна. Следует заметить, что отрицательное значение C_{σ} вообще характерно для неориентированного ПММА и составляет величину -2,87 согласно расчету с помощью компьютерной программы «Каскад» (ИНЭОС РАН).

В работе [3] предложена компенсация фотоупругого двулучепреломления полимера легированием анизотропной молекулой трансстильбена. В результате удалось нивелировать отрицательную величину двойного лучепреломления для полиметилметакрилата. В работе [4] разработана новая высокоскоростная двумерная автоматическая измерительная система, с помощью которой можно измерить распределение вектора двойного лучепреломления. Также можно измерить распределение внутренних напряжений в диске из полиметилметакрилата. Результаты, полученные в данном эксперименте, сравниваются с результатами, полученными с использованием метода конечных элементов. В работе [5] исследовано разрушение образца ПММА с использованием технологии когерентного градиентного зондирования (CGS). Предложен теоретический метод проведения анализа балки с двусторонними косыми трещинами.

Реооптическим методом изучают не только твердые пластики, но и растворы полимеров. В работе [6] изучен раствор полистирола и полиметилметакрилата в бензоле. Двулучепреломление потока раствора в стационарном сдвиговом потоке измерялось методом фазомодулированного двулучепреломления потока (PMFB). Получены величины коэффициента оптической чувствительности по напряжению для бимодальных растворов полистирола в бензоле и полиметилметакрилата в бензоле. Сравнили эти показатели для совместного раствора этих полимеров в том же растворителе. Получили простую линейную аддитивную зависимость.

В работе [7] исследованы коэффициенты оптической чувствительности по напряжению для пленок, нанесенных на гибкую подложку. В качестве полимеров использовали полиэтилентерефталат и полиэтиленнафталат, а в качестве покрытия – оксид индия-олова. Показано, что для подложек из полиэтиленнафталата коэффициент оптической чувствительности по напряжению меньше, чем для подложек из полиэтилентерефталата. Действительно, расчеты, проведенные с помощью компьютерной программы «Каскад» (разработка ИНЭОС РАН), показали, что для полиэтиленнафталата величина $C_{\sigma}=101$ Брюстер, а для полиэтилентерефталата $C_{\sigma}=141$ Брюстер.

Волокно-оптические датчики детально описаны в [8]. Рассматриваются компоненты таких датчиков и технологии их производства. В монографии Ван Кре-

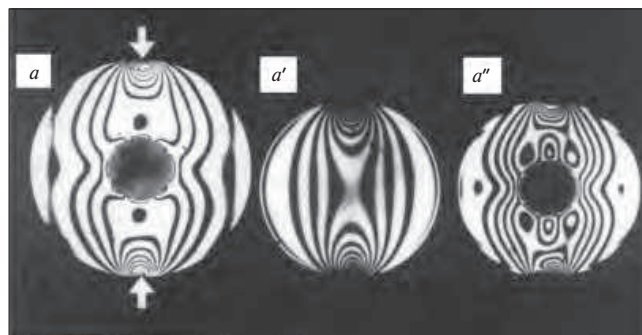


Рис. 1. Распределение напряжений в диске, сжатом сосредоточенной силой вдоль диаметра: a – диск с низко модульной вклейкой в центре; a' – диск из монолитного материала; a'' – диск с отверстием в центре
Fig. 1. Distribution of stresses in a disk compressed by a concentrated force along the diameter: a – disk with a low-modulus insert in the center; a' – disk made of a monolithic material; a'' – disk with a hole in the center

велена [9] описан способ расчета коэффициента оптической чувствительности по напряжению (метод Аскадского) на примере поликарбоната на основе бисфенола А. В работе [10] измерены реооптические и механические свойства циклических олефиновых сополимеров различного состава при температуре стеклования. Такие измерения позволяют прогнозировать оптическую анизотропию во многих оптических применениях в качестве линз датчика и волноводов в устройстве задней подсветки ЖК-дисплея.

Метод прогнозирования коэффициента оптической чувствительности по напряжению был предложен в работах [11–13]. В данной работе этот метод применен для прогнозирования коэффициента оптической чувствительности по напряжению для трехслойных полимерных материалов. В качестве слоев использовали отвержденную циклоалифатическую эпоксидную смолу и сетчатые полиамиды на основе 2,4-толуиленидиизоцианата.

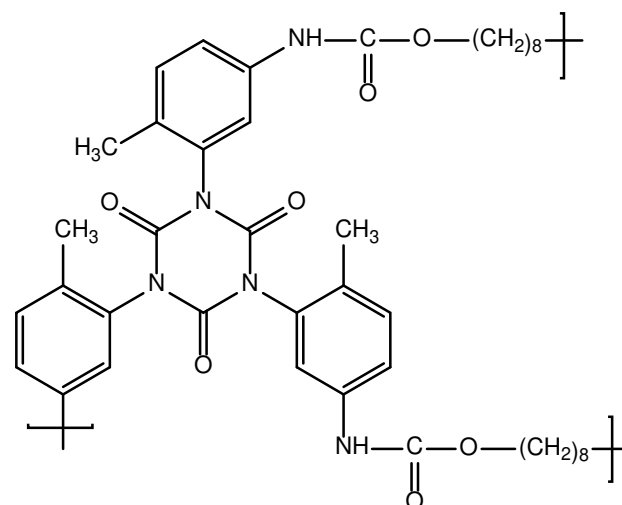
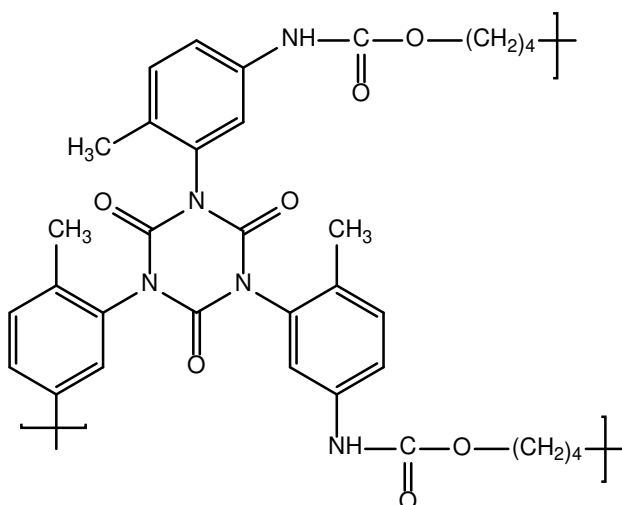
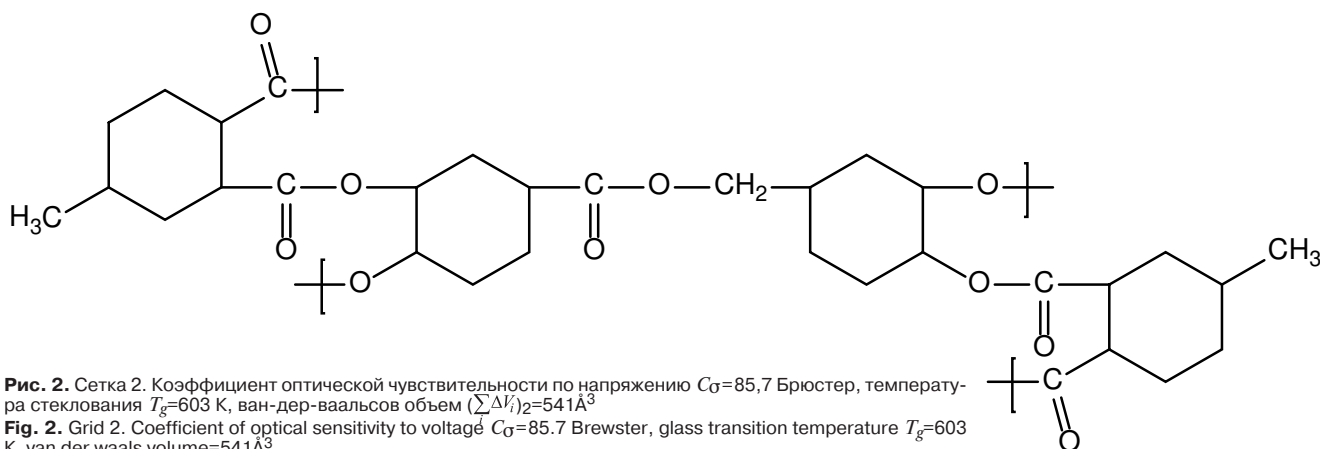
Расчетная часть

Коэффициент оптической чувствительности по напряжению C_{σ} весьма чувствителен к химическому строению полимера. Особенно интересны в этом отношении теплостойкие ароматические полимеры. Оптическая чувствительность данных полимеров на порядок выше оптической чувствительности традиционных алифатических полимеров.

Важность оптико-механических свойств полимеров связана с тем, что полимерные материалы нашли широкое применение в поляризационно-оптическом методе исследования напряжений.

Как уже было отмечено ранее, сущность метода заключается в том, что в результате приложения нагрузки к полимерному материалу в нем возникает двойное лучепреломление, которое затем может использоваться для построения диаграмм распределения напряжений и деформаций в полимерных конструкциях. В качестве примера на рис. 1 показан вид распределения напряжений в диске, сжатом сосредоточенной силой вдоль диаметра.

Сущность метода фотоупругости изложена в работах [11–13]. Метод основан на обнаруженном



Д. Брюстером явления двойного лучепреломления, возникающем в прозрачных оптически изотропных материалах при деформировании и обусловленном анизотропией показателя преломления в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для численной оценки коэффициента оптической чувствительности C_{σ} для полимеров, основанной на химической структуре их повторяющегося звена, в работе [11] предложено соотношение, которое связывает C_{σ} с параметрами химической структуры повторяющегося звена полимера:

$$C_{\sigma} = \frac{\sum_i C_i}{N_A \sum_i \Delta V_i} + \Pi, \quad (1)$$

где C_i – константы, характеризующие вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в коэффициент оптической чувствительности по напряжению; $\sum_i \Delta V_i$ – ван-дер-ваальсов объем повторяющегося звена, состоящий из объемов атомов, входящих в это звено; N_A – число Авогадро; $\Pi=0,3544 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{кг}$ (универсальный параметр).

Для расчета коэффициента оптической чувствительности по напряжению для образца, состоящего из трех пластин, коэффициент C_{σ} описывается следующим образом:

$$C_{\sigma} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k (C_{\sigma,k} - \Pi) \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}, \quad (2)$$

где $C_{\sigma,k}$ – коэффициент оптической чувствительности по напряжению k -го компонента; $\sum_i \Delta V_i$ – ван-дер-ваальсов объем повторяющегося звена, состоящий из объемов атомов, входящих в это звено; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – молярные доли компонентов 1, 2, ..., n .

В данном случае образцы состоят из трех молекулярных сеток. Тогда формула (2) примет следующий вид:

$$C_{\sigma} = \frac{\alpha_2 \cdot 541 \cdot (C_{\sigma,2} - \Pi) + \alpha_3 \cdot 568 \cdot (C_{\sigma,3} - \Pi) + \alpha_4 \cdot 705 \cdot (C_{\sigma,4} - \Pi)}{\alpha_2 \cdot 541 + \alpha_3 \cdot 568 + \alpha_4 \cdot 705} = \frac{\alpha_2 \cdot 541 \cdot C_{\sigma,2} + \alpha_3 \cdot 568 \cdot C_{\sigma,3} + \alpha_4 \cdot 705 \cdot C_{\sigma,4} - \Pi}{\alpha_2 \cdot 541 + \alpha_3 \cdot 568 + \alpha_4 \cdot 705} \quad (3)$$

Таблица 1
Table 1
Величины C_G при увеличивающихся молярных долях α_2
 C_G values at increasing mole fractions α_2

| Величины α_2 | Величины α_3 | Величины α_4 | C_G – П, Брюстер |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 0,1 | 0,45 | 0,45 | 175 |
| 0,2 | 0,4 | 0,4 | 166 |
| 0,3 | 0,35 | 0,35 | 157 |
| 0,4 | 0,3 | 0,3 | 148 |
| 0,5 | 0,25 | 0,25 | 139 |
| 0,6 | 0,2 | 0,2 | 129 |
| 0,7 | 0,15 | 0,15 | 118 |
| 0,8 | 0,1 | 0,1 | 108 |
| 0,9 | 0,05 | 0,05 | 97 |

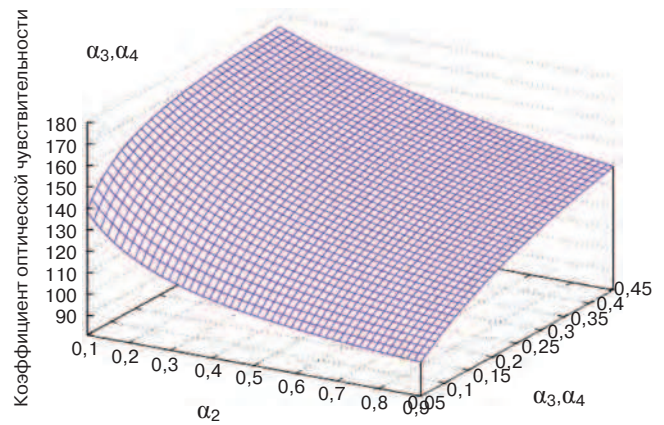


Рис. 5. Трехмерный график зависимости C_G при изменяющихся молярных долях $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, при $\alpha_3=\alpha_4$
Fig. 5. Three-dimensional graph of dependence C_G at changing mole fractions $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, at $\alpha_3=\alpha_4$

Таблица 2
Table 2
Величины C_G при увеличивающихся молярных долях α_3
 C_G values at increasing mole fractions α_3

| Величины α_2 | Величины α_3 | Величины α_4 | C_G – П, Брюстер |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 0,45 | 0,1 | 0,45 | 140 |
| 0,4 | 0,2 | 0,4 | 146 |
| 0,35 | 0,3 | 0,35 | 152 |
| 0,3 | 0,4 | 0,3 | 159 |
| 0,25 | 0,5 | 0,25 | 165 |
| 0,2 | 0,6 | 0,20 | 172 |
| 0,15 | 0,7 | 0,15 | 178 |
| 0,1 | 0,8 | 0,1 | 185 |
| 0,05 | 0,9 | 0,05 | 192 |

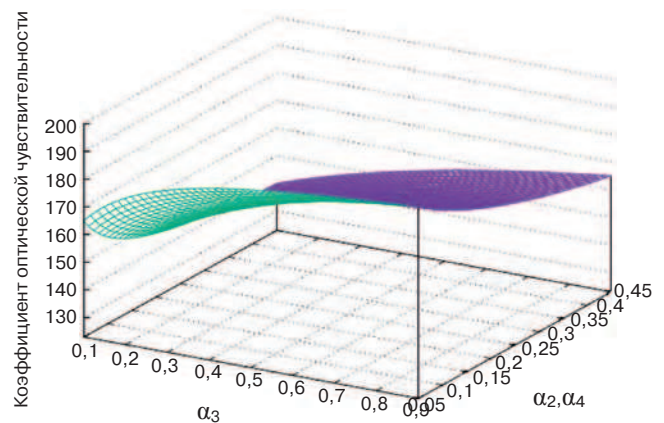


Рис. 6. Трехмерный график зависимости C_G при изменяющихся молярных долях $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, при $\alpha_2=\alpha_4$
Fig. 6. Three-dimensional graph of dependence C_G at changing mole fractions $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, at $\alpha_2=\alpha_4$

Таблица 3
Table 3
Величины C_G при увеличивающихся молярных долях α_4
 C_G values at increasing mole fractions α_4

| Величины α_2 | Величины α_3 | Величины α_4 | C_G – П, Брюстер |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 0,45 | 0,45 | 0,1 | 147 |
| 0,4 | 0,4 | 0,2 | 150 |
| 0,35 | 0,35 | 0,3 | 153 |
| 0,3 | 0,3 | 0,4 | 156 |
| 0,25 | 0,25 | 0,5 | 159 |
| 0,2 | 0,2 | 0,6 | 162 |
| 0,15 | 0,15 | 0,7 | 164 |
| 0,1 | 0,1 | 0,8 | 167 |
| 0,05 | 0,05 | 0,9 | 169 |

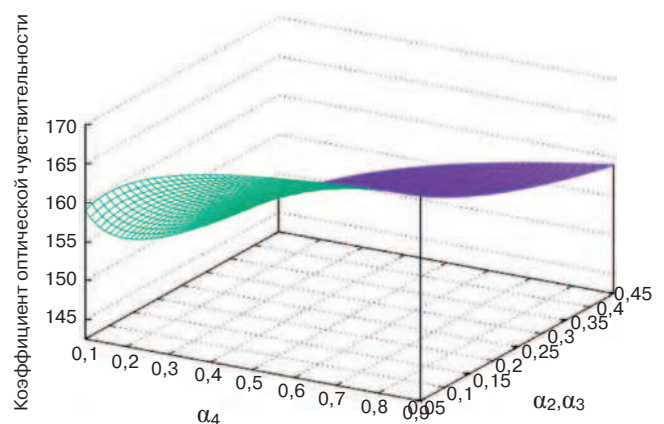


Рис. 7. Трехмерный график зависимости C_G при изменяющихся молярных долях $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, при $\alpha_2=\alpha_3$
Fig. 7. Three-dimensional graph of dependence C_G at changing mole fractions $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, at $\alpha_2=\alpha_3$

Перейдем к рассмотрению трехступенчатого образца, составленного из структур 2, 3 и 4. Эти структуры изображены на рис. 2–4.

Рассчитаем величины C_G для трехслойных композитов, принимая разные значения α_2, α_3 и α_4 , которые представляют собой молярные доли компонен-

тов 2, 3 и 4. Например, можно рассчитать составы, представленные в табл. 1. Расчеты проводятся по формуле (3). В табл. 1 величины α_2 возрастают, а величины α_3 и α_4 убывают, и при этом они равные.

На рис. 5 показан трехмерный график зависимости C_σ при изменяющихся молярных долях α_2 , α_3 и α_4 , при $\alpha_3 = \alpha_4$.

В табл. 2 величины α_3 возрастают, а величины α_2 и α_4 убывают, и при этом они равные.

На рис. 6 показан трехмерный график зависимости C_σ при изменяющихся молярных долях α_2 , α_3 и α_4 , при $\alpha_2 = \alpha_4$.

В табл. 3 величины α_4 возрастают, а величины α_2 и α_3 убывают, и при этом они равные.

На рис. 7 показан трехмерный график зависимости C_σ при изменяющихся молярных долях α_2 , α_3 и α_4 , при $\alpha_2 = \alpha_3$.

Проведенное исследование показало, что возможно получение сополимеров и слоистых материалов с самыми разными коэффициентами оптической чувствительности по напряжению; это позволяет их более широко использовать для построения моделей натуральных сооружений для метода фотоупругости применительно к натурным строительным конструкциям.

В МГСУ проведены расчеты и построены трехмерные диаграммы зависимостей коэффициента оптической чувствительности по напряжению от соотношения молярных долей структур. В ИНЭОС РАН предложена модель для расчета коэффициента оптической чувствительности по напряжению и химические структуры повторяющихся фрагментов сетчатых полимеров.

Список литературы / References

1. Синтез и изучение свойств оптически чувствительных материалов. *Сборник научных трудов Под общ. ред. Г.Л. Хесина и А.А. Аскадского*. М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1987. 220 с.
1. Synthesis and study of the properties of optically sensitive materials. *Collection of scientific works under the general editorship of G.L. Khesin and A.A. Askadsky*. Moscow: MISI im. V.V. Kuibysheva, 1987. 220 p. (In Russian).
2. Szczerowski Marcin K., Martynkien Tadeusz, Statkiewicz-Barabach Gabriela, Urbanczyk Wacław, Khan Lutful, and Webb David J. Measurements of stress-optic coefficient in polymer optical fibers. *Optics Letters*. 2010. Vol. 35. No. 12, pp. 2013–2015.
3. Ohkita H., Ishibashi K., Tsurumoto D., Tagaya A., Koike Y. Compensation of the photoelastic birefringence of a polymer by doping with an anisotropic molecule. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2005. Vol. 81, pp. 617–620.
4. Koyama T., Zhu Y., Otsuka T., Takada T., Murooka Y. An automatic measurement system for 2-dimensional birefringence vector distribution. *ICSD'98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International*

Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No.98CH36132). 1998, pp. 557–560. DOI: 10.1109/ICSD.1998.709346

5. Xu W., Yao X. F., Yeh H.Y., Jin G.C. Fracture investigation of PMMA specimen using coherent gradient sensing (CGS) technology. *Polymer Testing*. 2005. Vol. 24. Iss. 7, pp. 900–908. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.06.005>
6. Waxler R.M., Horowitz D., Feldman A. Optical and physical parameters of Plexiglas 55 and Lexan. *Applied Optics*. 1979. Vol. 18. Iss. 1, pp. 101–104. <https://doi.org/10.1364/AO.18.000101>
7. Lee Y.C., Liu T.S., Wu C.I., Lin W.Y. Investigation on residual stress and stress-optical coefficient for flexible electronics by photoelasticity. *Measurement*, 2012, Vol. 45, pp. 311–316.
8. Fiber Optic Sensors. An Introduction for Engineers and Scientists. Edited by Eric Udd. John Wiley & Sons, Inc. 2006. 518 p.
9. D.W. van Krevelen, Klaas te Nijenhuis. Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions. Elsevier. 2009. 1030 p.
10. Jong Sun Kim, Kyung Hwan Yoon, Julia A. Konfield. Measurement of stress-optical coefficient of COCs with different composition. *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 326–328, pp. 183–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.183>
11. Аскадский А.А., Прозорова С.Н., Слонимский Г.Л. Оптико-механические свойства ароматических теплостойких полимеров. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1976. Т. 18. № 3. С. 636–647.
11. Askadskii A.A., Prozorova S.N., Slonimskii G.L. Optical-mechanical properties of aromatic heat-resistant polymers. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya A*. 1976. Vol. 18, No. 3, pp. 636–647. (In Russian).
12. Аскадский А.А., Маршалкович А.С., Матвеева Т.П. Прогнозирование оптико-механических свойств полимеров, применяемых в методе фотоупругости. *Механика композитных материалов*. 1983. № 3. С. 906–913.
12. Askadskii A.A., Marshalkovich A.S., Matveeva T.P. Prediction of optical-mechanical properties of polymers used in the photoelasticity method. *Mekhanika kompozitnykh materialov*. 1983. No. 3, pp. 906–913. (In Russian).
13. Аскадский А.А., Пастухов А.В., Маршалкович А.С. Прогнозирование некоторых физических характеристик и получение оптически чувствительных эпоксидных полимеров. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1984. Т. 26. № 1. С. 160–171.
13. Askadskii A.A., Pastukhov A.V., Marshalkovich A.S. Prediction of some physical characteristics and production of optically sensitive epoxy polymers. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya A*. 1984. Vol. 26. No. 1, pp. 160–171. (In Russian).

УДК 699.86

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-81-85>

Б.А. ЕФИМОВ, канд. техн. наук (boris.alexandr.efimov@gmail.com),
 А.Ю. УШАКОВ, канд. техн. наук (903714@mail.ru), А.М. ТЯКИНА, магистрант (alina_tykina@mail.ru),
 А.М. МИНАЕВА, магистрант (20anna00@list.ru)

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

Структура и теплофизические характеристики газонаполненных полимеров

Термическое сопротивление и долговечность систем изоляции строительных конструкций, во-первых, обеспечивают комфортность в изолируемых помещениях, во-вторых, обеспечивают защиту строительной конструкции целиком от негативных атмосферных воздействий и в значительной степени зависят от свойств теплоизоляции. Многие свойства теплоизоляционных материалов, и в частности средняя плотность, теплопроводность, водопоглощение, паропроницаемость, теплопроводность и др. определяются свойствами полимерной матрицы (видом полимера, способом его полимеризации и поризации), а также пористостью и структурой пористости этих материалов. Цель исследований, представленных в работе – изучение взаимосвязи структуры газонаполненных полимеров и их теплофизических характеристик и проверка полученных решений путем испытания свойств материалов. На основании положения о том, что термическое сопротивление и долговечность систем изоляции строительных конструкций в значительной степени зависят от свойств теплоизоляции, излагаются требования к свойствам теплоизоляционных материалов. Обосновывается то, что теплофизические характеристики теплоизоляционных материалов, и в частности теплопроводность, определяются свойствами полимерной матрицы (видом полимера, способом его полимеризации и поризации), а также пористостью и структурой пористости этих материалов.

Ключевые слова: система изоляции, вспененные полимеры, теплопроводность, тепловой поток, водопоглощение.

Для цитирования: Ефимов Б.А., Ушаков А.Ю., Тякина А.М., Минаева А.М. Структура и теплофизические характеристики газонаполненных полимеров // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 81–85.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-81-85>

B.A. EFIMOV, Candidate of Sciences (Engineering) (boris.alexandr.efimov@gmail.com),

A.Yu. USHAKOV, Candidate of Sciences (Engineering) (903714@mail.ru), A.M. TYAKINA, Undergraduate, (alina_tykina@mail.ru),

A.M. MINAEVA, Master student (20anna00@list.ru)

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

Structure and Thermophysical Characteristics of Gas-Filled Polymers

Thermal resistance and durability of insulation systems of building structures, firstly, provide comfort in insulated rooms and, secondly, provide protection of the building structure entirely from negative atmospheric influences and largely depend on the properties of thermal insulation. Many properties of heat-insulating materials and, in particular, average density, thermal conductivity, water absorption, vapor permeability, thermal conductivity, etc. are determined by the properties of the polymer matrix (type of polymer, method of polymerization and porization), as well as porosity and structure the porosity of these materials. The purpose of the research presented in the article was to study the relationship between the structure of gas-filled polymers and their thermophysical characteristics and to verify the solutions obtained by testing the properties of materials. Based on the position that the thermal resistance and durability of insulation systems of building structures largely depend on the properties of thermal insulation, the requirements for the properties of thermal insulation materials are set out. It is substantiated that the thermophysical characteristics of heat-insulating materials and, in particular, thermal conductivity, are determined by the properties of the polymer matrix (the type of polymer, the method of its polymerization and porization), as well as the porosity and porosity structure of these materials.

Keywords: insulation system, foamed polymers, thermal conductivity, heat flow, water absorption.

For citation: Efimov B.A., Ushakov A.Yu., Tyakina A.M., Minaeva A.M. Structure and thermophysical characteristics of gas-filled polymers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 81–85. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-81-85>

Условия возведения и эксплуатации строительных объектов ставят перед строителями и проектировщиками задачи широкого плана. Главными из них могут рассматриваться минимизация отрицательной нагрузки на окружающую среду, повышение долговечности строительных конструкций, создание комфортных условий и требуемого микроклимата в помещениях, минимизация потерь тепла [1, 2]. В условиях строительства в суровых климатических условиях и на вечной мерзлоте реализация этих задач усложняется, но их актуальность при этом возрастает. Становится обязательной разработка решений, направленных либо на сохранение грунта в вечномерзлом состоянии, либо задача предотвращения пучения грунта [3, 4].

Решение этих задач предполагает использование эффективных теплоизоляционных материалов и применение изоляционных систем, способных обеспечить как долговечность строительных конструкций, так и нормативные теплотехнические показатели.

Стабильность и теплотехнические характеристики теплоизоляционного материала зависят от свойств компонентов, стабильного взаимодействия этих компонентов и условий формирования пористой структуры такого материала. Теплоизоляция защищает элементы конструкции от температурного воздействия, формируя благоприятные условия для безремонтной эксплуатации этой конструкции. Теплоизоляционный материал, будучи слабым элементом

конструкции, может разрушаться и терять свои свойства. Дegradaция свойств теплоизоляционного материала в конструкции может происходить в результате воздействия механических, а также температурных и тепловлажностных нагрузок [5, 6].

Теплоизоляционный материал, обладая высокопористой структурой, обеспечивает необходимое термическое сопротивление конструкции и стабильность ее свойств во времени. В строительстве в основном применяют две группы теплоизоляционных материалов: на основе минеральных волокон (каменных, стеклянных, базальтовых); на основе органического или гибридного волокна; минеральные вспененные материалы (пеностекло, вспученный перлит и вермикулит, пеногипс, ячеистый бетон), а также вспененные пластмассы: пенополистирол (в том числе экструдированный), пенополиуретан, пенополиэтилен, пенополиизоцианурат [7, 8]. Изделия на основе минеральных волокон в своем большинстве относят к негорючим или слабогорючим материалам. Большинство вспененных пластмасс – горючие материалы [9, 10].

Многие свойства теплоизоляционных материалов, и в частности средняя плотность, теплопроводность, водопоглощение, паропроницаемость и др., определяются свойствами полимерной матрицы (видом полимера, способом его полимеризации и поризации), а также пористостью и структурой пористости этих материалов [11, 12].

Развитие цифровых технологий способствует созданию новых методов и методики анализа как технологических процессов, так и изучения закономерностей формирования структуры, а следовательно, и свойств строительных материалов, в том числе теплоизоляционных. В развитии методик моделирования большую роль играет структурное моделирование с применением статистических методов [13, 14].

Понять закономерности формирования структуры и свойств высокопористых материалов в их взаимосвязи можно с применением методов моделирования: физического, аналогового, математического.

Предложенная методика моделирования основана на изучении взаимосвязи и взаимовлияния в структуре материала матрицы и формирующего его структуру компонента. Матрица может быть минеральной (мелкозернистый бетон, минеральное вяжущее, стеклофаза) или синтетической (полимерной). Свойства материала определяются, во-первых, свойствами матрицы (ее прочностными характеристиками, газо-, водо-, паропроницаемостью, теплофизическими свойствами); во-вторых, свойствами порообразующего компонента; в-третьих, условиями взаимодействия на поверхностях соприкосновения матрица – порообразующий компонент.

Эта методика моделирования применима для любых высокопористых материалов: ячеистых (полученных пенным способом, газообразованием или высоким водозатворением, а также материалов с применением легких или особо легких наполнителей (наполнителей).

Предложенная методика моделирования основана на пошаговом движении от реальных структур к идеализированным (формализованным) моделям в результате реализации последовательных предположений. В качестве примера рассматривается структура экструзионного пенополистирола – как одной из разновидностей вспененных пластмасс.

Экструзионный полистирол характеризуется замкнутой ячеистой структурой пористости, величина которой может достигать до 97–99%. Экструдированный пенополистирол обладает теплопроводностью в 0,03–0,34 Вт/(м·К), близкой к теплопроводности воздуха 0,026 Вт/(м·К). Материал выпускают с различными показателями плотности от 25 до 47 кг/м³.

Реальная структура этого материала (рис. 1) включает тонкие полимерные мембраны, являющиеся стенками ячеек, заполненных газом. Полимер имеет очень высокие прочностные показатели и практически нулевую проницаемость для газов, капельной влаги и паров воды. Свойства ячеек зависят от технологии вспенивания и типа вспенивающего агента.

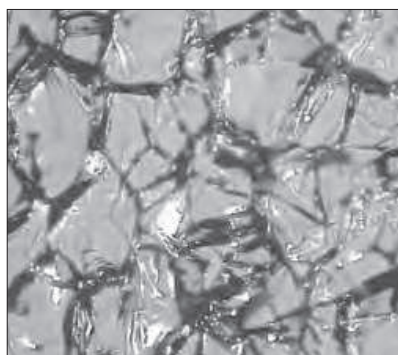


Рис. 1. Структура экструзионного пенополистирола
Fig. 1. Structure of extruded polystyrene foam

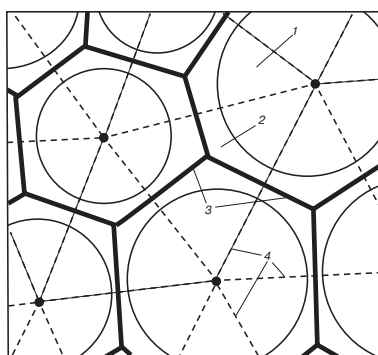


Рис. 2. Геометрия структуры на примере ячеистого материала: 1 – поры (ячейки) в материале; 2 – межпорные перегородки; 3 – расположение осей каркаса; 4 – расположение осей конвективных потоков
Fig. 2. Geometry of the structure on the example of a cellular material): 1 – pores (cells) in the material; 2 – inter-pore partitions; 3 – location of the axes of the frame; 4 – the location of the axes of convective flows

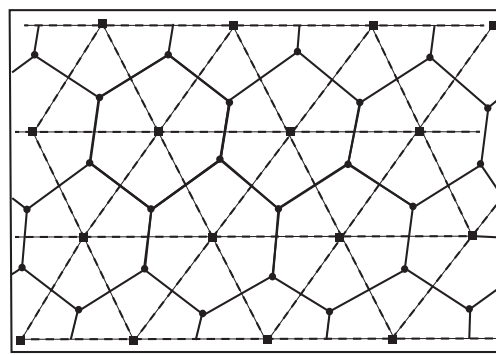


Рис. 3. Модельная структура ячеистого материала
Fig. 3. Model structure of cellular material

В современных технологиях в качестве вспенивающего компонента используется CO_2 . Это нейтральный газ, снижающий также воспламеняемость материала.

Первым этапом в процессе реализации модели является предположение, что структура состоит из регулярных повторяющихся элементов, имеющих форму, поддающуюся геометрическому описанию. Для матрицы аналогом являются стержни, соединяемые в узлах матрицы в тетраэдры; для ячеек как вариант регулярной структуры рассматриваются частицы округлой формы: сферической, эллиптической и им подобной (рис. 2). В первом приближении рассматриваются элементы одного размера; при детализации вводятся характеристики одномодального распределения – средний размер (математическое ожидание) и устанавливается допустимое отклонение от среднего (дисперсия результатов).

На втором этапе элементам структуры (ячейкам, осям каркаса) присваиваются определенные свойства. Осуществляется интегральная оценка свойств системы в целом с учетом характеристик каждого элемента. Основой интегральной оценки является структурное моделирование и построение математических моделей как статистических, так и на основе дифференциальных уравнений. На последних этапах осуществляется проверка адекватности моделей реальным процессам и определение границ, в которых модели сохраняют свою достоверность. Осуществляется физический эксперимент по оценке моделируемых характеристик материала.

Структурная модель является трехмерной фигурой, но для упрощения ее анализа и повышения наглядности можно рассматривать проекции подобной структуры на плоскость. В плоскостной проекции (рис. 2 и 3) выделяют две взаимосвязанные системы, факт взаимодействия которых и определяет основные свойства материала. Система, соединяющая центры ячеек, характеризует приоритетные направления движения конвективных потоков тепла и тепла, передаваемого излучением. Система, проходящая через матрицу и соединяющая центры соприкосновения наибольшего количества ячеек, является как несущим каркасом материала, так и основой для кондуктивных потоков тепла (рис. 3).

Целью исследований является изучение взаимосвязи структуры газонаполненных полимеров и их теплофизических характеристик и проверка полученных решений путем испытания свойств материалов.

Применение эффективной теплоизоляции, обладающей оптимизированной структурой, является одним из факторов, снижающим отрицательную нагрузку на окружающую среду и обеспечивающим экологическую безопасность как на уровне производства, так и применения материалов, а также в процессе эксплуатации систем изоляции [15, 16].

Материалы и методы

В отечественном строительстве наиболее используемыми синтетическими материалами, имеющими

ячеистую пористость, являются вспененные пластмассы. Поэтому экспериментальное подтверждение полученных теоретических выводов было проведено на основе изучения свойств экструзионного полистирола (XPS).

Теплопроводность во влажном и сухом состоянии определяли по ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Исследование теплопроводности и термического сопротивления материала XPS-образцов проводили на установке ИСК-У «Измеритель термического сопротивления строительных материалов».

Были изготовлены образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами $250 \times 250 \times 45$ мм, которые соответствуют размерам пластины прибора. Толщина образца равна толщине изделия. Определили массу образца в сухом и во влажном состоянии. Образец устанавливают между пластинами с фиксированным расстоянием между ними в горизонтальном положении. Измерения проводили при температуре в лабораторном помещении 21°C . Температура образца 31°C . После проведения испытания образца в сухом состоянии образец подвергался увлажнению. Затем на установке ИСК-У проводили экспериментальные определения теплопроводности (λ) во влажном состоянии. Проводились периодические измерения сигналов прибора до достижения установившегося (стационарного) теплового потока.

Результаты и обсуждение

Теплопроводность вспененных пластмасс определяется содержанием и характером структуры полимерного каркаса, размерами и распределением пор, а также состоянием паровоздушной (или газовой смеси) в этих порах. Результаты исследования теплопроводности, осуществленные для экструзионного пенополистирола (XPS), представлены в таблице.

В материале основными элементами, проводящими тепло, являются полимерная матрица и воздух в порах. Как отмечалось ранее, через матрицу потоки тепла идут конвективным способом. При теплопередаче через поры преобладает конвективный перенос тепла. Перенос тепла излучением пропорционален четвертой степени температуры (правило Кирхгофа) и становится значимым только при высокой температуре. Учитывая, что температурный предел применения полистирола 80°C , этот фактор теплопередачи малозначим.

Характеристикой поверхности, интенсивно проводящей тепло, является отношение площади, занимаемой полимерной матрицей, к общей площади поверхности, перпендикулярной тепловому потоку (S_M/S_T). В этом случае уравнение переноса тепла через XPS-поверхность (q) может быть выражено зависимостью:

$$q = q_{\text{я}} + q_{\text{м}},$$

где $q_{\text{я}}$ – поток тепла через ячейки структуры; $q_{\text{м}}$ – поток тепла через полимерную матрицу:

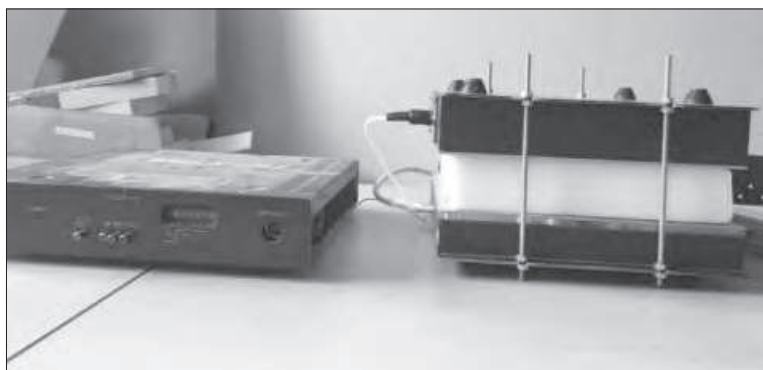
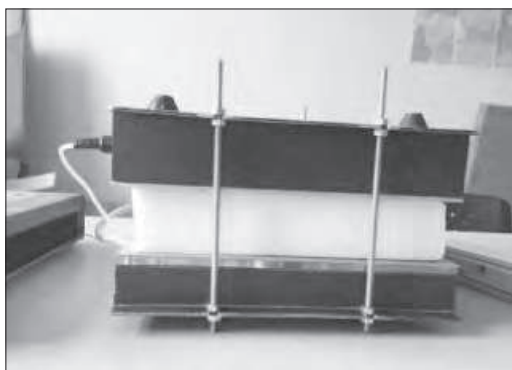


Рис. 4. Образцы в процессе экспериментальных определений теплопроводности
 Fig. 4. Samples in the process of experimental determinations of thermal conductivity

Кондуктивная составляющая потока тепла (q_k), проходящего через полимерную матрицу, определяется теплопроводностью матрицы ($\lambda_{п}$), градиентом температуры (∇t), а также временем измерения (τ):

$$q_k = \lambda_{п} \nabla t \cdot \tau.$$

Процесс протекает во времени и, учитывая невысокую температуропроводность полимерной матрицы, реализуется с определенным запозданием. Геометрической характеристикой этого потока является толщина межъячейковой перегородки в ее наименьшем сечении ($d_{п}$) и ранее предложенное соотношение площадей S_M/S_T .

Стандартное двухмерное температурное поле может быть определено путем численного решения нестационарного уравнения теплопроводности в условиях передачи тепла в плоском сечении исследуемого образца:

$$c_m \rho_m \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2},$$

где c_m — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); ρ_m — плотность, кг/м³; λ_x, λ_y — расчетные коэффициенты теплопроводности по соответствующим направлениям, Вт/(м·К); t — температура, °C; x, y — координаты, м; τ — время, с.

С учетом правила (закона) Фурье для тепловых потоков, а также учитывая, что в мелкоячеистой структуре и при температуре до 80°C конвекция выражена слабо (вклад в общий поток тепла не превышает 8–10%), получена формула оценки теплопроводности вспененных пластмасс:

$$\lambda_0 = 1,08 \cdot \frac{S_M}{S_T} \cdot \lambda_{п},$$

где λ_0 и $\lambda_{п}$ — теплопроводность экструзионного пенополистирола в сухом состоянии и теплопроводность полимера, формирующего матрицу.

Теплопроводность пенополистирола зависит от большого числа факторов. Для исследования процесса передачи тепла в пенополимерах, а соответственно и для изучения их теплопроводности могут использоваться вышеизложенные структурные модели.

Экспериментальное подтверждение теоретических предпосылок взаимосвязи структуры и свойств газонаполненных полимеров осуществлялось в процессе реализации натуральных экспериментов. Исследования проводились в НИУ МГСУ, Институте строительной физики (НИИСФ РААСН); часть экспериментальных исследований была проведена с использованием средств Коллективного исследовательского центра имени профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета, который частично поддерживается Министерством науки и образования Российской Федерации, контракт № 075-15-2021-662.

Заключение

Оценка и описание закономерностей формирования свойств вспененных пластмасс реализована на основе применения установленных закономерностей формирования ячеистых (высокопористых) структур.

Теплопроводность вспененных пластмасс является функцией их пористости, теплопроводности и состояния минеральной матрицы, состоянием паровоздушной (или газовой смеси) в этих порах, а также наличием влаги в этих порах.

Эксплуатационная стойкость, в том числе и морозостойкость, вспененных пластмасс определяется содержанием и характером структуры полимерного каркаса, размерами и распределением пор, наличием влаги в порах и сопротивляемостью каркасообразующего материала температурно-влажностным воздействиям.

Результаты экспериментальных определений теплопроводности образцов теплоизоляционного материала XPS

Results of experimental determinations of the thermal conductivity of XPS heat-insulating material samples

| Показатель | Характеристики образцов XPS |
|--|-----------------------------|
| Плотность в сухом состоянии ρ_0 , кг/м ³ | 38,59 |
| Теплопроводность в сухом состоянии λ_0 , Вт/(м·°C) | 0,0166 |
| Теплопроводность во влажном состоянии λ_w , Вт/(м·°C) | 0,0171 |
| Среднее приращение теплопроводности на 1% влажности $\Delta\lambda$, Вт/(м·°C)·10 ⁻² | 0,00394 |

Применение эффективной теплоизоляции, обладающей оптимизированной структурой, является одним из факторов, обеспечивающих экологическую безопасность как на уровне производства, так и применения материалов, а также в процессе эксплуатации систем изоляции.

Список литературы / References

1. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Foam polymers in multifunctional insulating coatings. *Polymers*. 2021. Vol. 13 (21). 3698. <https://doi.org/10.3390/polym13213698>
2. Semenov V.S., Bessonov, I.V., Zhukov Zh.A., Mednikova E.A., Govryakov I.S. Thermal insulation systems for road bases with foam glass gravel. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. Vol. 110 (2). 11003. DOI: 10.34910/MCE.110.3
3. Pilipenko A., Ter-Zakaryan K., Bobrova E., Zhukov A. Insulation systems for extreme conditions. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2019. Vol. 19, pp. 1819–2586. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.112>
4. Zhukov A., Bessonov I., Medvedev A., Zinovieva E., Mednikova E. Insulation systems for structures on pile supports. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 258 (361). 09088. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809088>
5. Bessonov I.V., Bogomolova L.K., Zhukov A.D., Zinoveva E.A. Building systems based on foamed modified polymers. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 887, pp. 446–452. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.446>
6. Zhukov A., Medvedev A., Poserenin A., Efimov B. Ecological and energy efficiency of insulating systems. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 135. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503070>
7. Nardi L., Perilli S., De Rubeis T., Sfarra S., Ambrosini D. Influence of insulation defects on the thermal performance of walls an experimental and numerical investigation. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 21, pp. 355–365 DOI: 10.1016/j.jobe.2018.10.029
8. Жуков А.Д., Тер-Закарян К.А., Бессонов И.В., Семёнов В.С., Старостин А.В. Системы строительной изоляции с применением пенополиэтилена // *Строительные материалы*. 2018. № 9. С. 58–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-58-61>
8. Zhukov A.D., Ter-Zakaryan K.A., Bessonov I.V., Semenov V.S., Starostin A.V. Systems of construction insulation with the use of foam polyethylene. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 9, pp. 58–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-58-61>
9. Ibrahim O., Younes R. Progress to global strategy for management of energy systems. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20, pp. 303–316 DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.020
10. Umnyakova N. Heat exchange peculiarities in ventilated facades air cavities due to different wind speed. In book: *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II*. London, UK: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2016, pp. 655–660.
11. Gnip I.J., Keršulis V.J., Vaitkus S.J. Predicting the deformability of expanded polystyrene in long-term compression. *Mechanics of Composite materials*. 2005. Vol. 41 (5), pp. 407–414.
12. Shen X., Li L., Cui W., Feng Y. Coupled heat and moisture transfer in building material with freezing and thawing process. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20, pp. 609–615. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.026
13. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Попов И.И., Демисси Бекеле Арега. Системный анализ технологических процессов // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17 (4), pp. 73–82. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-4-73-82>
13. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Popov I.I., Arega D.B. System analysis of technological processes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17 (4), pp. 73–82. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-4-73-82>
14. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Бекеле Арега. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2020. Т. 12. № 6. С. 313–319. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
14. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Arega D.B. Application of statistical methods for solving problems of building materials science. *Nanotechnologii v stroitel'stve: scientific online journal*. 2020. Vol. 12. No. 6, pp. 313–319. (In Russian). DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319
15. Теличенко В.И., Орешкин Д.В. Материаловедческие аспекты геоэкологической и экологической безопасности в строительстве // *Экология урбанизированных территорий*. 2015. № 2. С. 31–33.
15. Telichenko V.I., Oreshkin D.V. Material science aspects of geoecological and ecological safety in construction. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2015. No. 2, pp. 31–33. (In Russian).
16. Умнякова Н.П. Взаимосвязь экологического состояния городов и долговечности строительных материалов и конструкций // *Жилищное строительство*. 2012. № 1. С. 30–33.
16. Umnyakova N.P. The relationship between the ecological state of cities and the durability of building materials and structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 1, pp. 30–33. (In Russian).

УДК 691.42

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>

А.С. ПИЛИПЕНКО¹, канд. техн. наук (pilipenko.ans@gmail.com),
М.Б. КАДДО¹, канд. техн. наук (m.kaddo@yandex.ru);
М.О. АСАМАТДИНОВ², д-р философии по техническим наукам (marat.asamatdinov@mail.ru);
Б.Б. ТУРГАНБАЕВ^{1,2}, магистрант (paluaniyazovv@gmail.com)

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

² Каракалпакский государственный университет им. Бердаха (230112, Узбекистан, Республика Каракалпакстан, г. Нукус, ул. Ч. Абдилова, 1).

Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан

Рассмотрены вопросы создания энергоэффективных керамических материалов на основе местного сырья Республики Каракалпакстан. Использование в составе керамических масс пористого невыгорающего наполнителя позволит получить материалы с пониженной по сравнению с традиционными керамическими изделиями плотностью, использовать жесткие смеси с пониженным содержанием воды, значительно сокращая затраты на сушку изделий, повысив при этом однородность пористого керамического черепка. Цель исследований заключалась в разработке рецептур керамических пористых изделий и отработке режимов их сушки и обжига. В качестве невыгорающего наполнителя использовано гранулированное пеностекло, спекающееся при обжиге с керамическим камнем в единое целое. Пеностекло имеет невысокую среднюю плотность (140–200 кг/м³), невысокое водопоглощение (до 5 мас. %) и полностью совместимо с керамическим черепком, что делает возможным получение изотропных изделий. Установлена оптимальная плотность керамического материала, не превышающая 1400 кг/м³. Оптимизация наиболее энергоемкого процесса обжига осуществлялась методами математического планирования и обработки результатов эксперимента. Установлена оптимальная для обжигового изделия средняя плотность дробленого пеностекла (140–150 кг/м³), а также в результате аналитической оптимизации и графической интерпретации результатов эксперимента получена номограмма для выбора параметров и оценки свойств изделия в зависимости от расхода пеностекла и температуры обжига.

Ключевые слова: керамические изделия, аналитическая оптимизация, сушка, обжиг керамических изделий, измельченное пеностекло.

Для цитирования: Пилипенко А.С., Каддо М.Б., Асаматдинов М.О., Турганбаев Б.Б. Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 86–91.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>

A.S. PILIPENKO¹, Candidate of Sciences (Engineering) (pilipenko.ans@gmail.com),

M.B. KADDO¹, Candidate of Sciences (Engineering), (m.kaddo@yandex.ru);

M.O. ASAMATDINOV², Ph.D. (Engineering), (marat.asamatdinov@mail.ru);

B.B. TURGANBAEV^{1,2}, Master student, (paluaniyazovv@gmail.com)

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

² Karakalpak State University named after Berdakh (1, Ch. Abdirov Street, Nukus, 230112, Republic of Karakalpakstan, Uzbekistan)

Ceramic Insulated Blocks Based on Local Raw Materials of the Republic of Karakalpakstan

The article devoted to the question of production of energy-efficient ceramic materials based on local raw materials of the Republic of Karakalpakstan. The usage of a porous non-burning filler in the composition of ceramic masses will make it possible to obtain materials with a reduced medium density (compared to traditional ceramic products), to use rigid mix designs with a low water content, significantly reducing the cost of drying products, while increasing the uniformity of the porous ceramic shard. The purpose of the research was to develop mix designs for porous ceramic products and to develop the schemes of their drying and firing. Granular foam glass was used as non-burning filler, which is sintered during firing with a ceramic shard into a single whole. Foam glass has a low average density (140–200 kg/m³), low water absorption (up to 5% by weight) and is fully compatible with a ceramic shard, which makes it possible to obtain isotropic products. The optimum density of the ceramic material is established as the result, which does not exceed 1400 kg/m³. Optimization of the most energy-intensive firing process was carried out by methods of mathematical planning and processing of experimental results. The optimal average density of crushed foam glass (140–150 kg/m³) was established for the firing process. Also, a nomogram for selecting parameters and evaluating the properties of the product depending on the consumption of foam glass and the firing temperature was obtained as a result of analytical optimization and graphical interpretation of the experimental results.

Keywords: ceramic products, analytical optimization, drying, firing of ceramic products, crushed foam glass.

For citation: Pilipenko A.S., Kaddo M.B., Asamatdinov M.O., Turganbaev B.B. Ceramic insulated blocks based on local raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 86–91. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>

Кирпич является одним из наиболее долговечных материалов, применяемых в строительстве. Практика показывает, что при любых условиях эксплуатации конструкции из керамических обожженных материалов имеют высшую категорию надежности и безремонтный срок эксплуатации, превышающий

100 лет [1–3]. Кладка из керамического кирпича сохраняет свои свойства столетиями.

Ориентация отечественной экономики на энергетическую эффективность не могла не отразиться и на технологиях производства керамического кирпича, и на требованиях к изделиям, и на системах примене-

ния этих изделий. Во-первых, технология изготовления керамического кирпича связана с процессами обжига, что предполагает значительные расходы энергии. Во-вторых, запасы глинистого сырья хотя и значительны, но тем не менее имеют предел. С этим пределом уже столкнулись некоторые отечественные заводы, вынужденные работать на привозном основном сырье (глинах) [4–6].

В-третьих, классические виды керамических изделий (лицевой, пустотелый кирпич, камни) имеют относительно высокую теплопроводность, что предполагает использование комбинированных конструкций с применением эффективной теплоизоляции: систем фасадных теплоизоляционных композиционных, вентилируемых фасадов с утеплением, колодезной кладки с утеплением в различных вариантах исполнения. Использование подобных решений усложняет технологию монтажа, предполагает применение дополнительных материалов (теплоизоляционных, облицовочных) и местами снижает надежность самих конструкций [7–9].

Применение крупноформатных керамических камней позволяет возводить строительные конструкции с термическим сопротивлением, близким к нормативным значениям. Такие камни имеют хорошие прочностные и теплофизические показатели, но недостаточную для наружных (лицевых) изделий морозостойкость. Поэтому их рекомендуется использовать в системах с облицовкой фасадных поверхностей лицевого кирпичом [10–12].

Таким образом, теплопроводность классических керамических изделий не позволяет изготавливать конструкции с требуемым по современным теплотехническим нормам термическим сопротивлением. Исследования, результаты которых изложены в данной статье, направлены на решение этой задачи, а именно на разработку рецептов и приемов изготовления изделий строительной керамики с пониженной теплопроводностью по энергосберегающим технологиям, что и определяет актуальность разрабатываемой тематики.

Важным аспектом современного строительства является создание благоприятных условий и микроклимата в помещениях. В первую очередь речь идет о тепловлажностном режиме в помещениях и о создании акустического комфорта. Натурные испытания и исследования, проведенные на моделях, показывают, что кирпичная кладка имеет удовлетворительные показатели по тепловлажностным характеристикам переноса, но обладает недостаточным термическим сопротивлением.

Модификация систем на основе кирпичной кладки может быть реализована следующими способами: дополнительным утеплением изнутри или снаружи с защитной облицовкой, использованием слоистой кладки или применением поризованных керамических изделий [8–10]. Если первые два способа могут быть осуществлены реализацией проектных решений на строительной площадке, то последний связан с технологией строительной керамики.

Представляет интерес также использование местного сырья в составе шихты с температурой обжига, не превышающей 950°C. К такому виду сырья относятся суглинки, запасы которого значительны и присутствуют во многих регионах, в том числе в Каракалпакстане. Наиболее крупные карьеры глины находятся при Нукусском, Ходжейлийском, Кунградском и Чимбайском месторождениях. Общие запасы глинистого сырья составляют 60 млн м³, при этом из двадцати исследованных месторождений используется одиннадцать [13].

Поризация керамического изделия осуществляется за счет применения выгорающих добавок (угольной пыли, отсева полистирола, опилок, рисовой шелухи), за счет пенообразования, а также за счет введения пористых наполнителей, спекающихся в керамическом черепке (вспученных перлита и вермикулита, пеностекла, искусственных минеральных гранул) [8–10].

Недостатками технологии пенокерамики и изделий из нее является необходимость использования многокомпонентных смесей, а также приготовления стойкой пены. Большое количество компонентов снижает технологичность реализации способа их применения: если хотя бы одного из компонентов не будет хватать для приготовления смеси, способ осуществить невозможно. Кроме того, в состав смеси входят некоторые относительно дорогостоящие компоненты, что автоматически приводит к росту стоимости готовых изделий.

Существенным недостатком является длительность процесса изготовления изделий из-за наличия операции сушки отформованных образцов по мягким и длительным режимам. Кроме того, известный способ производства предусматривает использование большого количества дорогостоящих жаростойких форм для изготовления образцов, что еще в большей мере повышает себестоимость пенокерамических изделий.

Таким образом, решение задачи по созданию энергоэффективной технологии производства пористых стеновых керамических изделий является по-прежнему актуальным. Получение таких изделий на основе местного глинистого сырья с применением пеностекольного наполнителя достаточно перспективно, но требует дополнительных исследований как сырья, так и процессов структурообразования изделий в процессе формирования и закрепления структуры.

Предварительные исследования проводились в НИУ МГСУ и показали принципиальную возможность направленного структурообразования керамических материалов с пеностекольным наполнителем, однако представляется возможным еще более увеличить энергоэффективность технологии за счет разработки более точной модели, связывающей свойства сырья, процессы, происходящие при обжиге, и свойства готовых изделий.

Материалы и методы

Цель исследований заключалась в разработке рецептов керамических изделий на основе измельченного вспененного стекла и отработки режимов их

обжига. Для реализации цели были поставлены следующие частные задачи:

- исследовать свойства гранулированного пеностекла и определить оптимальный размер фракций;
- определить оптимальную температуру и продолжительность сушки изделий;
- в процессе реализации и обработки результатов эксперимента определить оптимальный расход пеностекла;
- определить оптимальную температуру обжига;
- по результатам исследований и изучения теоретических аспектов поставленной задачи разработать научную концепцию и обоснование изготовления энергоэффективной керамики с применением легких пористых невыгорающих наполнителей.

Керамические образцы изготавливали на основе гранулированного измельченного пеностекла (30–50 мас. %) и суглинка формованием, сушкой и обжигом. Температура спекания глины регулировалась введением плавня, пластичность – введением электролита. Процесс сушки исследовали на образцах-кубиках 50×50×50 мм. Расход воды составлял 30–40% от массы твердых компонентов. Плотность сырья составляла 1250–1300 кг/м³. Конечная влажность изделий после сушки – 4%.

Оптимизация результатов эксперимента осуществлялась аналитическим методом, разработанным в НИУ МГСУ и реализованным при изучении рецептов и технологий различных строительных материалов [14, 15].

Интерпретация полученных оптимизированных полиномов (аналитическая, физическая и графическая) позволила провести дополнительные эксперименты в области рассчитанных оптимумов с целью проверки и подтверждения полученных расчетным путем результатов.

Результаты и обсуждение

Основными причинами высокой энергоемкости керамических изделий являются тепловые процессы, и в частности сушка и обжиг. Режим обжига определяется свойствами используемых глин и в проектируемой технологии температурными свойствами гранулированного пеностекла. В качестве объектов исследования изучались процессы сушки



Рис. 1. Обожженные керамические пористые образцы на основе пеностекла и суглинка
Fig. 1. Fired porous ceramic sample cubes based on foam glass and loam

и обжига керамических образцов с применением пеностекла.

Проектные режимы сушки теплоизоляционных изделий эффективны, если обеспечено постоянство управления всем технологическим процессом на всех предшествующих сушке операциях. Использование легкого наполнителя (пеностекла) позволило применять более жесткие режимы сушки (по сравнению с пенокерамикой). При начальной температуре теплоносителя до 90°С изделия сохраняли высокое качество.

В результате экспериментов по оптимизации параметров переменного режима сушки высокое качество изделий получено при режимах, ограничивающих срок сушки 6 ч. Такой режим может быть реализован в противоточных туннельных сушилках.

Исследование процесса обжига осуществлялось в соответствии с теорией эксперимента, основные параметры были приняты методом математического планирования эксперимента. Образцы формовались в металлических формах, после чего подвергались принудительной сушке на протяжении 6 ч (в зависимости от влажности) и после контроля воздушной усадки и средней плотности подвергались обжигу при температуре 1000°С до получения прочного керамического камня. Средняя плотность полученных образцов составила ~1300 кг/м³; предел прочности при сжатии – 14,5 МПа. Некоторые из полученных в результате эксперимента образцов представлены на рис. 1.

В качестве варьируемых факторов были приняты средняя плотность пеностекла (X_1), расход гранулированного пеностекла (X_2), размер части пеностекла (X_3)

**Условия эксперимента
Experimental conditions**

| Фактор | Символ, X_i | Среднее значение фактора \bar{X}_i | Интервал варьирования ΔX_i | Значения фактора на уровнях | |
|---|---------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------|
| | | | | -1 | +1 |
| Средняя плотность измельченного пеностекла, кг/м ³ | X_1 | 140 | 40 | 100 | 180 |
| Расход измельченного пеностекла, кг/м ³ | X_2 | 40 | 10 | 30 | 50 |
| Средний размер частиц пеностекла, мм | X_3 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,7 |
| Температура обжига, °С | X_4 | 970 | 30 | 940 | 1000 |

и температура обжига (X_4). В качестве функций отклика приняты: прочность изделия при сжатии (Y_1) и его средняя плотность образцов (Y_2). Условия эксперимента представлены в таблице. Сушку сырья осуществляли до постоянной массы изделия при температуре 90°C и скорости теплоносителя 4 м/с. Длительность сушки образцов $50\times 50\times 50$ мм в сушильном шкафу составляла 6 ч.

В процессе реализации эксперимента и обработки его результатов были получены уравнения регрессии. После проверки значимости коэффициентов (при доверительных интервалах по прочности 0,2 МПа и по средней плотности 9 кг/м³) получены следующие математические модели.

Для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 13,6 + 0,8X_1 - 1,7X_2 + 0,7X_3 + 1,2X_4 + 0,8X_2X_4 - 0,4X_3^2. \quad (1)$$

Для средней плотности:

$$Y_2 = 1378 + 18X_1 - 51X_2 + 14X_3 - 31X_4 + 12X_2X_4 - 18X_4^2. \quad (2)$$

Значения значимых коэффициентов и характер уравнений регрессии (квадратичная зависимость по среднему размеру частиц и по температуре обжига позволяют реализовать оптимизированные решения по факторам X_3 и X_4 с использованием метода аналитической оптимизации.

Метод аналитической оптимизации функций четырех переменных основан на применении методов математического анализа при исследовании свойств полиномов, полученных в результате математической обработки экспериментальных данных (1 и 2). Каждая из функций дифференцируется по каждому из факторов, имеющему коэффициенты второго порядка, и производная приравнивается к нулю.

С помощью полинома (1) определялся оптимальный размер частиц измельченного пеностекла:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_3} = 0,7 - 0,8X_3 = 0 \rightarrow X_3 = \frac{0,7}{0,8} = 0,88.$$

С помощью табл. 1 определялось оптимальное значение среднего размера частиц пеностекла (фактор X_3) в натуральном выражении:

$$d_{\text{пс}} = 0,5 + 0,88 \cdot 0,2 + 0,68 \pm 0,06 \text{ мм.}$$

С помощью полинома (2) определялась оптимальная температура обжига керамической смеси, содержащей суглинок и измельченное вспененное стекло:

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_4} = 31 - 36X_4 = 0 \rightarrow X_4 = \frac{31}{0,36} = 0,86.$$

С помощью табл. 1 определяем оптимальную температуру обжига (фактор X_4) в градусах Цельсия:

$$t_{\text{opt}} = 960 + 0,86 \cdot 30 = 986 \pm 6^\circ\text{C}.$$

Подставляем найденные оптимальные значения в функции (1 и 2):

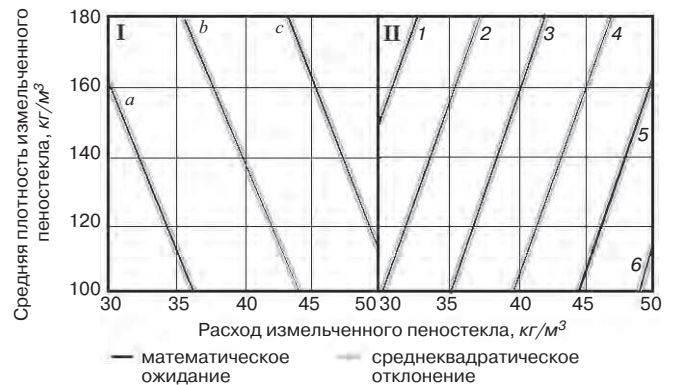


Рис. 2. Номограмма для прогнозирования свойств и подбора состава изделий при оптимальном размере частиц измельченного пеностекла, равном $0,68 \pm 0,06$ мм, и оптимальной температуре обжига $986 \pm 6^\circ\text{C}$: черная линия – математическое ожидание; серая линия – среднее квадратическое отклонение. Средняя плотность, кг/м³: a – 1320; b – 1360; c – 1400. Прочность при сжатии, МПа: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13. Сектор I – определение средней плотности; II – определение прочности при сжатии.

Fig. 2. Nomogram for predicting properties and selecting the composition of products with the optimal particle size of crushed foam glass equal to $0,68 \pm 0,06$ mm and the optimal firing temperature of $986 \pm 6^\circ\text{C}$: solid black line – mathematical expectation; gray area around black line – standard deviation. Average density, kg/m³: a – 1320; b – 1360; c – 1400. Compressive strength, MPa: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13. Sector I – determination of the average density; II – determination of compressive strength

$$Y_1 = 13,6 + 0,8X_1 - 1,7X_2 + 0,7 \cdot 0,88 + 1,2 \cdot 0,86 + 0,7 \cdot 0,86 - 0,3 \cdot (0,88)^2;$$

$$Y_2 = 1378 + 18X_1 - 51X_2 + 14 \cdot 0,88 - 31 \cdot 0,86 + 11X_2 \cdot 0,88 - 18 \cdot (0,86)^2.$$

Получаем оптимизированные по $X_3 = 0,88$ и по $X_4 = 0,86$ уравнения:

$$Y_1 = 15,6 + 0,8X_1 - 1,7X_2; \quad (3)$$

$$Y_2 = 1360 + 18X_1 - 41X_2. \quad (4)$$

Графическая интерпретация оптимизированных зависимостей (3 и 4) дала возможность сформировать номограмму (рис. 2), позволяющую прогнозировать свойства изделий и осуществлять подбор состава керамических смесей. С учетом того, что базовые полиномы являются продуктами статистической обработки экспериментальных данных, на номограмме учитывались характеристики нормального распределения, математическое ожидание (среднее значение) и среднее квадратическое отклонение (дисперсия распределения) каждого из варьируемых факторов.

Используя базовые (1 и 2) и оптимизированные уравнения (3 и 4), а также с помощью номограммы можно определить оптимальные расходы измельченного пеностекла с учетом его средней плотности при оптимизированных значениях размеров частиц измельченного пеностекла и температуры обжига. С помощью базовых уравнений (1 и 2) могут также решаться прогностические задачи по оценке свойств изделий в зависимости от значений варьируемых факторов.

После проведения расчетов с помощью номограммы, представленной на рис. 2, подобранные составы проверялись путем проведения натурных испытаний, заключающихся в изготовлении образцов (приготовление смесей, формование, сушка и обжиг) и оценке прочности и средней плотности по нормативным методикам.

Оценка влияния факторов на свойства изделий осуществлялась путем анализа уравнений регрессии (1 и 2) и позволила сделать следующие выводы.

Наибольшее влияние и на прочность при сжатии, и на среднюю плотность изделий оказывает расход измельченного пеностекла (коэффициенты при X_2), при этом увеличение его расхода приводит к снижению средней плотности и снижению прочности при сжатии (знак перед коэффициентом). Это может быть объяснено тем, что гранулы пеностекла имеют меньшую прочность и плотность по сравнению с керамическим черепком. Соответственно увеличение их присутствия в составе керамических масс приводит к понижающим эффектам. При этом влияние расхода (X_2) на снижение прочности может быть уменьшено за счет оптимизации температуры обжига (коэффициент при X_2X_4). Это может быть объяснено флюсующим действием наполнителя и спеканием керамического черепка и наполнителя по поверхностям контакта. Увеличение плотности измельченного пеностекла приводит к увеличению прочности и плотности обожженного изделия (соответствующие коэффициенты при X_1 , равные 0,8 и 18).

В процессе проведения эксперимента установлена корреляция между теплопроводностью образцов (λ) и их средней плотностью (ρ), которая в интервале плотности от 1300 до 1400 кг/м³ может быть выражена следующей зависимостью:

$$\lambda = 0,14 + \rho \cdot 4 \cdot 10^{-5}.$$

При анализе уравнений установлены эффекты парного взаимодействия и X_2X_4 как для средней плотности, так и для прочности керамических образцов. Характер (синергетический или антагонистический) этих взаимодействий будет определен при изучении физико-химических процессов обжига и

формирования структур по поверхностям контакта «пеностекло–керамический материал».

В дальнейшем планируется проведение дополнительной серии испытаний керамических изделий для уточнения полученных зависимостей при варьировании типа глинистого сырья.

Исследования проводились в НИУ МГСУ; Каракалпакском ГУ им. Бердаха; часть экспериментальных исследований была проведена с использованием средств Центра коллективного пользования имени профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета, который частично поддерживается Министерством науки и образования Российской Федерации, контракт № 075-15-2021-662.

Заключение

Керамический кирпич и стеновые камни являются негорючими материалами, имеющими высокую эксплуатационную стойкость, что обуславливает высокую долговечность строительных конструкций на их основе. Снизить их теплопроводность, а следовательно, повысить тепловую эффективность конструкций возможно за счет применения пористой керамики, и в частности при использовании особо легких заполнителей, совместимых с керамическим черепком и не ухудшающих параметры сушки и обжига. К таким изделиям относятся керамические материалы с невыгорающей добавкой, формирующей пористую структуру, – дробленным пеностеклом с размером частиц от 1 до 5 мм.

Формирование свойств энергоэффективных керамических изделий обусловлено исходным составом глиняных смесей, условиями сушки изделий и температурой обжига. Установлено, что оптимальной температурой сушки является температура 90°C при скорости теплоносителя 4 м/с. На свойства изделий после обжига большее влияние оказывает расход дробленого пеностекла и его свойства. При этом установлены синергетические эффекты усиления совместного влияния как на прочность, так и на среднюю плотность изделий расхода измельченного пеностекла и температуры обжига.

Список литературы

1. Семенов А.А. Состояние российского рынка керамических стеновых материалов // *Строительные материалы*. 2014. № 8. С. 9–12.
2. Richman R.C., Clanfrone C. and Pressnail K.L. More sustainable masonry façade: Preheating ventilation air using a dynamic buffer zone // *Journal of building physics*. 2018. Vol. 34. No. 1, pp. 27–41. DOI: <https://doi.org/10.1177/1744259109355729>
3. Kloseiko P., Arumagi E., Ralamees T. Hydrothermal performants of internally insulated brick wall in cold climate: a case study in a historical school building // *Journal of building physics*. 2015.

References

1. Semenov A.A. The state of the Russian market of ceramic wall materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2014. No. 8, pp. 9–12. (In Russian).
2. Richman R.C., Clanfrone C., Pressnail K.L. More sustainable masonry façade: Preheating ventilation air using a dynamic buffer zone. *Journal of building physics*. 2018. Vol. 34. No. 1, pp. 27–41. DOI: <https://doi.org/10.1177/1744259109355729>
3. Kloseiko P., Arumagi E. and Ralamees T. Hydrothermal performants of internally insulated brick wall in cold climate: a case study in a historical school building. *Journal of building physics*. 2015. Vol. 38.

- Vol. 38. No. 5, pp. 444–464. DOI: <https://doi.org/10.1177/1744259114532609>
4. Лобов О.И., Ананьев А.И., Ананьев А.А. Энергоэффективность, долговечность и безопасность наружных стен зданий из керамических материалов // *Строительные материалы*. 2010. № 4. С. 10–15.
 5. Ищук М.К., Гогуа О.К., Фролова И.Г. Особенности работы гибких связей в стенах с лицевым слоем из каменной кладки // *Строительные материалы*. 2018. № 7. С. 40–44.
 6. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>.
 7. Гуров Н.Г., Котлярова Л.В. Выбор эффективных технологий при производстве стеновых керамических изделий в современных условиях // *Строительные материалы*. 2004. № 2. С. 6–7.
 8. Горбунов Г.И., Расулов О.Р. Использование рисовой соломы в производстве керамического кирпича // *Вестник МГСУ*. 2014. № 11. С. 128–136. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.11.128-136>
 9. Горбунов Г.И., Расулов О.Р. Проблемы рациональной утилизации рисовой соломы // *Вестник МГСУ*. 2013. № 7. С. 106–113. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.11.128-136>
 10. Makoond N., Pela L. and Molins C. Dynamic elastic properties of brick masonry constituents // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 199, pp. 756–770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.071>
 11. Kodzoev M.-B., Isachenko S., Bobrova E., Efimov B. and Bessonov I. Ceramic products and energy-efficient systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. 032006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032006>
 12. Talpa B.V. and Kotlyar V.D. Siliceous clay is perspective raw materials effective wall ceramic. *Proceedings the second International conference «Clays minerals and layered materials 2013» – CMLM*. 2013. 107 p.
 13. Ешимбетов У.Х. Современное состояние добывающей промышленности и добычи минерально-сырьевых ресурсов Республики Каракалпакстан // *«Иқтисодийет ва инновацион технологиялар» илмий электрон журналы*. 2016. № 6. С. 1–9.
 14. Pyataev E.R., Pilipenko E.S., Burtseva M.A., Mednikova E.A., Zhukov A.D. Composite material based on recycled concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. 032041. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032041>
 15. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2020. Т. 12. № 6. С. 313–319. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>
 - No. 5, pp. 444–464. DOI: <https://doi.org/10.1177/1744259114532609>
 4. Lobov, O.I., Ananiev A.I. and Ananiev A.A. Energy efficiency, durability and safety of the outer walls of buildings made of ceramic materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 4, pp. 10–15.
 5. Ischuk M.K., Gogua O.K. and Frolova I.G. Features of the work of flexible connections in walls with a face layer of masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 7, pp. 40–44. (In Russian).
 6. Rubtsov O.I., Bobrova E.Yu., Zhukov A.D., Zinov'eva E.A. Ceramic brick, stones and the full brick walls. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 9, pp. 8–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-1>
 7. Gurov N.G. and Kotlyarova L.V. Selection of effective technologies in the production process of wall ceramic products in modern conditions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 2, pp. 6–7. (In Russian).
 8. Gorbunov G.I., Rasulov O.R. The use of rice straw in the production of ceramic bricks. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 11, pp. 128–136. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.11.128-136>
 9. Gorbunov G.I., Rasulov O.R. Problems of rational utilization of rice straw. *Vestnik MGSU*. 2013. No. 7, pp. 106–113. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.11.128-136>. (In Russian).
 10. Makoond N., Pela L. and Molins C. Dynamic elastic properties of brick masonry constituents. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 199, pp. 756–770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.071>
 11. Kodzoev M.-B., Isachenko S., Bobrova E., Efimov B. and Bessonov I. Ceramic products and energy-efficient systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. 032006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032006>.
 12. Talpa B.V., Kotlyar V.D. Siliceous clay is perspective raw materials effective wall ceramic. *Proceedings the second International conference «Clays minerals and layered materials 2013» – CMLM*. 2013. 107 p.
 13. Eshimbetov U.Kh. Current state of mining industry and extraction of mineral resources of the Republic of Karakalpakstan. *Iqtisodiyet va innovatsion tekhnologiyalar ilmiy elektron zhurnali*. 2016. No. 6, pp. 1–9.
 14. Pyataev E.R., Pilipenko E.S., Burtseva M.A., Mednikova E.A. and Zhukov A.D. Composite material based on recycled concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. 032041. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032041>
 15. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demissi B.A. Application of statistical methods for solving problems of building materials science. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: scientific Internet-journal*. 2020. Vol. 12. No. 6, pp. 313–319. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>

И.В. СТЕПИНА, канд. техн. наук (sudeykina@mail.ru),
М. СОДОМОН, инженер (аспирант) (sodomonmarc@yahoo.fr)

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

Совместимость модифицированного растительного сырья с органополимерными связующими

Целью представленной работы является расчет совместимости модифицированного моноэтаноламин(N→B)-тригидроксидоборатом растительного сырья (измельченных стеблей борщевика Сосновского) с некоторыми органополимерными связующими (поливинилацетат, полиуретан и казеин) для создания в дальнейшем композиционных материалов на их основе. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: вычисление энергии когезии и величины ван-дер-ваальсова объема элементарного звена модифицированной подложки; расчет параметра растворимости Гильдебранда модифицированной подложки и органополимерных связующих; определение оптимального состава композитных материалов на основе модифицированного растительного сырья и полимерных связующих. В ходе работы установлено, что для предсказания совместимости модифицированной целлюлозы растительного сырья с органополимерными связующими может быть использован метод расчета взаимной растворимости. На основании этого метода установлено, что наилучшая совместимость наблюдается при использовании в качестве связующих для модифицированного растительного сырья избытка казеина и полиуретана. Две композиции: казеин(избыток)-модифицированная целлюлоза и полиуретан(избыток)-модифицированная целлюлоза могут быть рекомендованы для создания композиционных материалов на их основе.

Ключевые слова: растительное сырье, модифицирование, совместимость, взаимная растворимость, энергия когезии, ван-дер-ваальсов объем, композиционные материалы.

Коллектив авторов выражает благодарность Андрею Александровичу Аскадскому (Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН)) за помощь в проведении исследования.

Для цитирования: Степина И.В., Содомон М. Совместимость модифицированного растительного сырья с органополимерными связующими // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 92–96. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-92-96>

I.V. STEPINA, Candidate of Sciences (Engineering), M. SODOMON, Engineer (Graduate student)
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Compatibility of Modified Plant Raw Materials with Organopolymer Binders

The aim of this work is to calculate the compatibility of modified monoethanolamine (N→B)-trihydroxyborate plant materials (crushed stems of Sosnowski's hogweed) with some organopolymer binders (polyvinyl acetate, polyurethane and casein). To achieve this goal, the following tasks were solved. Calculation of the cohesion energy and the value of the Van der Waals volume of the elementary link of the modified substrate; calculation of the Hildebrand solubility parameter of the modified substrate and organopolymer binders; determination of the optimal composition of composite materials based on modified plant materials and polymer binders. In the course of the work, it was found that the method of calculating mutual solubility can be used to predict the compatibility of modified plant cellulose with organopolymer binders. Based on this method, it was found that the best compatibility is observed when excess casein and polyurethane are used as binders for modified plant materials. Two compositions: casein (excess)-modified cellulose and polyurethane (excess)-modified cellulose can be recommended for creating composite materials based on them.

Keywords: plant materials, modification, compatibility, mutual solubility, cohesive energy, van der Waals volume, composite materials.

The team of authors is grateful to Andrey Alexandrovich Askadskii (AN Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)) for his help in the research.

For citation: Stepina I.V., Sodomon M. Compatibility of modified plant raw materials with organopolymer binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 11, pp. 92–96. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-92-96>

Растительное сырье, такое, например, как стебли трав, кустарников, стволы и ветви деревьев, при определенных условиях может стать основой для производства композитных строительных материалов широкого назначения. Это могут быть теплоизоляционные, отделочные или конструкционные материалы. Применение растительного сырья в современных строительных технологиях имеет целый ряд преимуществ. Во-первых, это экологичность конечного продукта, обусловленная природным происхождением основного компонента. Во-вторых, широкая распространенность, доступность и возобнов-

ляемость источников сырья. В-третьих, легкость обработки, а следовательно, минимальные издержки на производство, что обеспечивает высокий экономический эффект от их применения. Все вышесказанное вызывает повышенный интерес исследователей к комплексному применению растительного сырья для создания эффективных композитных материалов на его основе.

Природное происхождение сырья обуславливает необходимость его защиты от биокоррозии и огня перед применением для создания строительных композитов. Наиболее эффективным способом защиты,

по мнению целого ряда исследователей [1–6], является химическая модификация природного материала. В процессе химического модифицирования меняется состав и структура поверхностного слоя клеточных стенок растительного сырья. Это необходимо учитывать при создании композитов с использованием модифицированных подложек, поскольку именно поверхностный слой играет ключевую роль при формировании зоны контакта со связующим. В этой связи прогнозирование сродства двух компонентов (модифицированное растительное сырье и органополимерные связующие) при создании строительных композитов является весьма актуальной проблемой. Решение этой проблемы и стало целью нашей работы.

Несомненно, что сродство между макромолекулами различного химического строения связано со сродством их мономерных звеньев. Примером может служить высокое сродство нитроцеллюлозы и поливинилацетата [7]. При отсутствии сродства между мономерными звеньями полимеры, безусловно, не совмещаются. Но и неограниченное смешение мономеров отнюдь не означает, что сами полимеры будут взаимно растворимы. Для прогноза совместимости полимеров необходимо учитывать следующие виды межмолекулярных взаимодействий между ними [8]: связывание за счет образования водородных связей и межмолекулярное водородное связывание. Высокое значение в этой связи имеют и специфические межмолекулярные взаимодействия, такие как диполь-дипольное (ориентационное/кисомовское); деформационное (индукционное/дебаевское) и дисперсионное (лондоновское) взаимодействия [9]. Авторы работы [10] выдвигают концепцию «взаимодополняющего различия», согласно которой неограниченное смешение полимеров возможно в том случае, если макромолекулы каждого из них содержат различные функциональные группы, способные вступать во взаимодействие друг с другом. В работах [11, 12] установлено, что наилучшая совместимость наблюдается для макромолекул с противоположными по функциональности группами. Влияние электроотрицательности заместителей на совместимость полимеров рассмотрено в работах [13, 14].

В представленной работе в качестве растительного сырья авторы использовали измельченные стебли борщевика Сосновского, модифицированные моноэтаноламин(N→В)-тригидроксиборатом (МЭАТГБ).

В качестве связующих рассматривали поливинилацетат (ПВА), полиуретан (ПУ) и казеиновый клей (КК). Анализ совместимости модифицированной МЭАТГБ целлюлозы борщевика с органополимерными связующими был проведен на основании критериев (1) и (2), предложенных в работах [15, 16].

Совместимость наблюдается, если при введении первого полимера во второй выполняется условие:

$$\mu_1 = \frac{\delta_{п,1}^2}{\delta_{п,2}^2} < 1,374\beta_1; \quad (1)$$

при введении второго полимера в первый:

$$\mu_2 = \frac{\delta_{п,2}^2}{\delta_{п,1}^2} < 1,374\beta_2, \quad (2)$$

где δ_1 и δ_2 – параметры растворимости полимеров 1 и 2 соответственно.

Согласно источнику [16]:

$$\beta_1 = \Phi \left(\Phi - \sqrt{\Phi^2 + \frac{\gamma_{п,1}}{\gamma_{п,2}} - 2\Phi \left(\frac{\gamma_{п,1}}{\gamma_{п,2}}\right)^{0,5}} \right); \quad (3)$$

$$\beta_2 = \Phi \left(\Phi - \sqrt{\Phi^2 + \frac{\gamma_{п,2}}{\gamma_{п,1}} - 2\Phi \left(\frac{\gamma_{п,2}}{\gamma_{п,1}}\right)^{0,5}} \right), \quad (4)$$

где $\gamma_{п,1}$ и $\gamma_{п,2}$ – поверхностные энергии полимеров 1 и 2 соответственно.

Значение Φ (5) рассчитывается через отношение молярных объемов полимеров [16]:

$$\Phi = \frac{4(V_{п,1}V_{п,2})^{1/3}}{(V_{п,1}^{1/3} + V_{п,2}^{1/3})^2}, \quad (5)$$

где $V_{п,1}$ и $V_{п,2}$ – молярные объемы полимеров 1 и 2 соответственно.

Предсказание совместимости широко распространённых полимеров возможно осуществить с помощью ЭВМ программы «Каскад» (ИНЭОС РАН) путем расчета величин поверхностного натяжения (γ), параметра растворимости (δ) и молярного объема (V), необходимых для анализа совместимости. Но поскольку структура модифицированной целлюлозы не заложена в программу «Каскад», то расчеты были выполнены вручную.

Ван-дер-ваальсовы объемы атомов (ΔV_i) рассчитывали по формуле (6) [16]:

$$\Delta V_i = \frac{4}{3} * \pi R^3 - \sum_i \pi h_i^2 (3R - h_i), \quad (6)$$

где R – межмолекулярный радиус данного атома; h_i – высота шарового сегмента, который отсекается на данном атоме соседним химически связанным с ним атомом.

Величины h_i вычисляли по формуле (7) [16]:

$$h_i = R - \frac{R^2 d_i^2 - R_i^2}{2d_i}, \quad (7)$$

где R_i – межмолекулярный радиус соседнего, химически связанного атома; d_i – длина химической связи.

Значения длин химических связей и межмолекулярных радиусов атомов брали из литературных источников [17–19]. Согласно проведенным ранее исследованиям [20, 21] элементарное звено модифи-

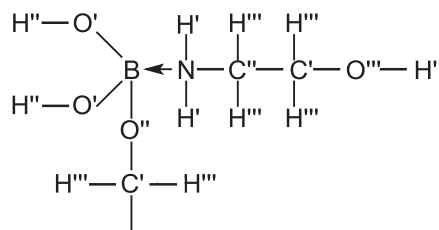


Рис. 1. Модифицированный фрагмент элементарного звена целлюлозы
Fig. 1. Modified fragment of the elementary unit of cellulose

Таблица 1
Table 1

Рассчитанные значения величин высот шаровых сегментов и ван-дер-ваальсовых объемов атомов
Calculated values of the heights of spherical segments and van der Waals volumes of atoms

| АТОМ | $h_i, \text{Å}$ | $\Delta V_i, \text{Å}^3$ |
|------|---|--------------------------|
| O' | $h_{O-H}=0,597$ $h_{O-B}=1,008$ | 7,101 |
| O'' | $h_{O-C}=1,073$ $h_{O-B}=1,008$ | 3,637 |
| O''' | $h_{O-C}=1,074$ $h_{O-H}=0,598$ | 5,6 |
| C' | $h_{C-O}=0,586$ $h_{C-H}=0,394$ $h_{C-C}=1,03$ | 16,21 |
| C'' | $h_{C-N}=0,8321$ $h_{C-H}=0,394$ $h_{C-C}=1,03$ | 14,63 |
| B | $h_{B-O}=0,652$ $h_{B-N}=0,77$ | 10,48 |
| N | $h_{N-B}=0,851$ $h_{N-H}=0,523$ $h_{N-C}=1,168$ | 5,8 |
| H' | $h_{H-N}=1,137$ | 3,5 |
| H'' | $h_{H-O}=0,853$ | 4,7 |
| H''' | $h_{H-C}=1,496$ | 2 |

цированной целлюлозы борщевика может быть представлено следующим образом, рис. 1. Обозначим штрихами повторяющиеся атомы элементов в его составе, имеющие сходное окружение.

Рассчитанные величины высот шаровых сегментов и вычисленные на их основе значения ван-дер-ваальсовых объемов атомов представлены в табл. 1.

На основании данных табл. 2 рассчитали ван-дер-ваальсов объем повторяющегося фрагмента целлюлозы борщевика, модифицированного МЭАТГБ:

$$\sum_i \Delta V_i = 2 * \Delta V_{O'} + \Delta V_{O''} + \Delta V_{O'''} + 2 * \Delta V_{C'} + \Delta V_{C''} + \Delta V_B + \Delta V_N + 2 * \Delta V_{H'} + 3 * \Delta V_{H''} + 6 * \Delta V_{H'''};$$

$$\sum_i \Delta V_i = 2 * 7,101 + 3,64 + 5,6 + 2 * 16,21 + 14,63 + 10,48 + 5,8 + 2 * 3,5 + 3 * 4,7 + 6 * 2;$$

$$\sum_i \Delta V_i = 119,75 \text{ Å}^3.$$

Энергию когезии рассчитывали следующим образом [16] (8):

$$\sum_i \Delta E_i^* = 4 * \Delta E_{O'}^* + 11 * \Delta E_{H'}^* + 3 \Delta E_C^* + \Delta E_N^* + \Delta E_H^* + x; \quad (8)$$

$$\sum_i \Delta E_i^* = 4 * 596 + 11 * 200 + 3 * 2300 + 5040 + 16423 + x;$$

$$\sum_i \Delta E_i^* = 32947 + x,$$

где x – энергия когезии атома бора.

Величина $\delta_{П1}$ рассчитывается по уравнению [16] (9):

$$\delta_{П1}^2 = \frac{\Delta E^*}{N_A * \sum_i \Delta V_i} = \frac{\sum_i E_i^*}{N_A * \sum_i \Delta V_i}, \quad (9)$$

где $\Delta E^* = k \Delta E_0$ – энергия когезии жидкости или повторяющегося звена полимера, уменьшенная во столько раз, во сколько ван-дер-ваальсов объем молекулы или звена меньше мольного объема; k – коэффициент молекулярной упаковки жидкости или полимера; N_A – число Авогадро.

Параметр растворимости Гильдебранда $\delta_{П1}$ рассчитывали по соотношению [16] (10):

$$\delta_{П1} = \sqrt{\frac{\sum_i E_i^*}{N_A * \sum_i \Delta V_i}}. \quad (10)$$

В нашем случае величина δ зависит от величины x :

$$\begin{aligned} \delta_{П1} &= \sqrt{\frac{\sum_i E_i^*}{N_A * \sum_i \Delta V_i}} = \sqrt{\frac{32947 + x}{0,6023 * \sum_i \Delta V_i}} = \\ &= \sqrt{\frac{32947 + x}{0,6023 * 119,75}} = \sqrt{\frac{32947 + x}{72,125}}. \end{aligned}$$

Поверхностное натяжение рассчитывали по уравнению (11) [16]:

$$\gamma_{П1} = \frac{A_j * \sum_i E_i^*}{\sum_i \Delta V_i^{\frac{2}{3}}}, \quad (11)$$

где согласно литературным источникам [16] $A_j = 0,0287$. Тогда поверхностное натяжение повторяющегося фрагмента целлюлозы борщевика, модифицированного МЭАТГБ, рассчитывается по соотношению (12):

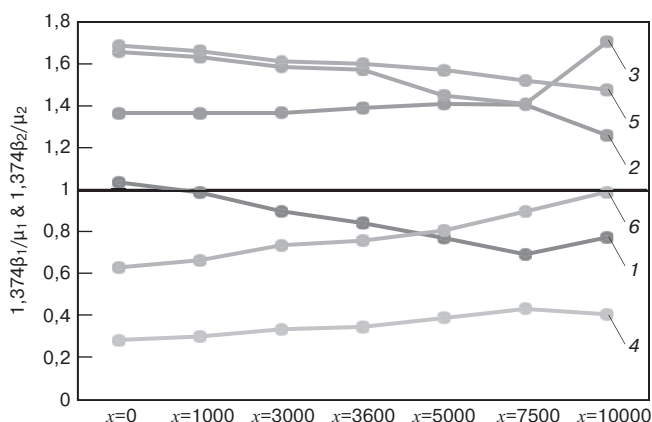
$$\begin{aligned} \gamma_{П1} &= \frac{A_j * \sum_i E_i^*}{\sum_i \Delta V_i^{\frac{2}{3}}} = \frac{0,0287 * (32947 + x)}{(119,75)^{\frac{2}{3}}} = \\ &= 0,0011813127(26351 + x). \end{aligned} \quad (12)$$

Величины δ и γ при разных значениях x приведены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Величины δ и γ для повторяющегося фрагмента целлюлозы борщевика, модифицированного МЭАТГБ, при разных значениях x
The values of δ and γ for a repeating fragment of cellulose of hogweed modified with MEATGB at different values of x

| Величина x , Дж/моль | Параметр растворимости δ , (Дж/см ³) ^{1/2} | Поверхностное натяжение γ , мН/м ² |
|------------------------|--|--|
| 0 | 21,37 | 38,92 |
| 1000 | 21,69 | 40,1 |
| 3000 | 22,32 | 42,46 |
| 3640 | 22,52 | 43,22 |
| 5000 | 22,94 | 44,83 |
| 7500 | 23,68 | 47,78 |
| 10000 | 24,4 | 50,73 |



Зависимость совместимости модифицированной целлюлозы с некоторыми полимерами от величины энергии когезии атома бора (x) и природы полимера: 1 – m.cell+PVA(exc); 2 – m.cell+PVA; 3 – m.cell+PU(exc); 4 – m.cell+PU; 5 – m.cell+casein(exc); 6 – m.cell+casein

Dependence of the compatibility of modified cellulose with some polymers on the cohesion energy of the boron atom (x) and the nature of the polymer: 1 – m.cell+PVA(exc); 2 – m.cell+PVA; 3 – m.cell+PU(exc); 4 – m.cell+PU; 5 – m.cell+casein(exc); 6 – m.cell+casein

Мольный объем рассчитывали по уравнению (12) [16]:

$$V_{П1} = \frac{N_A \cdot \sum_i \Delta V_i}{k} = \frac{0,6023 \cdot 119,75}{0,681}; \quad (13)$$

$$V_{П1} = 105,92 \text{ \AA}^3.$$

Подобным образом были рассчитаны параметры растворимости и поверхностного натяжения для органополимерных связующих – поливинилацетата (ПВА), полиуретана (ПУ) и казеинового клея (КК). Полученные значения использовали для расчета критериев совместимости модифицированной целлюлозы с органополимерными связующими. Систематизированные результаты расчетов представлены на рисунке. Полученные данные показывают, что при смешивании модифицированной целлюлозы растительного сырья с ПВА практически для всех значений энергии когезии атома бора, за исключением нулевой, совместимость наблюдается при избытке модифицированной целлюлозы. При избытке ПВА только при нулевом значении энергии когезии атома бора вероятно удовлетворительная совместимость. При использовании в качестве связующих для модифицированной целлюлозы растительного сырья полиуретана и казеина удовлетворительная совместимость вероятно при избытке связующих при любых значениях энергии когезии атома бора.

Из уравнений (1) и (2) понятно, что совместимость элементарных звеньев полимеров вероятно при условии $(1,374\beta_1/\mu_1) > 1$ и $(1,374\beta_2/\mu_2) > 1$. Причем очевидно, что чем больше абсолютное значение частного, тем выше совместимость полимеров. Из рис. 2 видно, что наихудшей совместимостью из исследуемых пар полимеров обладает пара модифицированная целлюлоза(избыток)-полиуретан (m.cell+PU(exc)). Немного лучшей совместимостью, но, однако, все же

неудовлетворительной обладают пары модифицированная целлюлоза(избыток)-казеин (m.cell+casein) и модифицированная целлюлоза-ПВА(избыток) (m.cell+PVA(exc)). Перечисленные пары полимеров в указанных соотношениях не могут быть рекомендованы для создания композиционных материалов на их основе из-за неудовлетворительной прогнозируемой совместимости.

Наилучшей совместимостью из исследуемых пар полимеров обладает модифицированная целлюлоза-казеин(избыток) (m.cell+casein(exc)). На втором месте по совместимости пара модифицированная целлюлоза-полиуретан(избыток) (m.cell+PU(exc)). Существенный отрыв этих пар полимеров от менее совместимой пары модифицированная целлюлоза(избыток)-ПВА (m.cell+PVA(exc)) можно объяснить высоким сродством казеина и полиуретана, состоящих из элементарных фрагментов, встречающихся в живой природе, и природным полимером – целлюлозой.

Таким образом, для предсказания совместимости модифицированной целлюлозы растительного сырья с органополимерными связующими может быть использован метод расчета взаимной растворимости. На основании этого метода установлено, что наилучшая совместимость наблюдается при использовании в качестве связующих для модифицированной целлюлозы избытка казеина и полиуретана. Две композиции: казеин(избыток)-модифицированная целлюлоза и полиуретан(избыток)-модифицированная целлюлоза могут быть рекомендованы для создания композиционных материалов на их основе.

Список литературы / References

1. Покровская Е.Н., Портнов Ф.А. Мягкое поверхностное химическое модифицирование – метод создания долговечных огнезащитных материалов. *Современные пожаробезопасные материалы и технологии: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной году гражданской обороны*. Иваново. 20–21 сентября 2017 г. С. 119–122.
1. Pokrovskaya E.N., Portnov F.A. Soft surface chemical modification – a method for creating durable fireproof materials. *Modern fireproof materials and technologies: Collection of materials of the International scientific and practical conference dedicated to the Year of Civil Defense*. Ivanovo. September 20–21, 2017, pp. 119–122. (In Russian).
2. Broda M. Natural compounds for wood protection against fungi-A review. *Molecules*. 2020. Vol. 25. No. 15. DOI 10.3390/molecules25153538.
3. Schmidt O. Wood and tree fungi: Biology, damage, protection, and use. Springer-Verlag. 2006. 336 p. DOI: 10.1007/3-540-32139-X

4. Husaini A.A., Sing N.N., Fun C.S. [et al.] Smart polymer composites for wood protection. *Smart Polymer Nanocomposites. Biomedical and Environmental Applications. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*. 2021, pp. 377–397. DOI: 10.1016/B978-0-12-819961-9.00014-1
5. Zhu Y. Surface protection of wood with metal acetylacetonates. *Coatings*. 2021. Vol. 11. No. 8. DOI: 10.3390/coatings11080916
6. Бруяко М.Г., Бессонов И.В., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Сорбционные свойства модифицированного борщевика Сосновского // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-54-59>
6. Bruyako M.G., Bessonov I.V., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Sorption properties of modified Sosnovsky's hogweed. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 10, pp. 54–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-54-59>
7. Тагер А.А., Бессонов Ю.С., Сивкова Е.Я., Ануфриев В.А., Выгодский Я.С., Салазкин С.Н. Теплоты растворения кардовых полигетероариленов и вклады в них отдельных группировок макромолекул // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1979. Т. 21. № 9. С. 2136–2141. http://polymsci.ru/static/Archive/1979/VMS_1979_T21_9/VMS_1979_T21_9_2136-2141.pdf
7. Tager A.A., Bessonov Yu.S., Sivkova E.Ya., Anufriev V.A., Vygodsky Ya.S., Salazkin S.N. Heats of dissolution of carded polyheteroarylenes and the contributions of individual groupings of macromolecules to them. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Series A*. 1979. Vol. 21. No. 9, pp. 2136–2141. http://polymsci.ru/static/Archive/1979/VMS_1979_T21_9/VMS_1979_T21_9_2136-2141.pdf (In Russian).
8. Аскадский А.А., Матвеев Ю.И., Матевосян М.С. О предказации растворимости полимеров // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1990. Т. 32. № 10. С. 2157–2166.
8. Askadsky A.A., Matveev Yu.I., Matevosyan M.S. On the prediction of the solubility of polymers. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Series A*. 1990. Vol. 32. No. 10, pp. 2157–2166. (In Russian).
9. Аскадский А.А., Болобова А.В., Кондращенко В.И., Щербухин В.Д. Расчетная оценка физических характеристик ряда природных полимеров // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2000. Т. 42. № 3. С. 517–529.
9. Askadskii A.A., Bolobova A.V., Kondrashchenko V.I., Shcherbukhin V.D. Estimation of the physical characteristics of some natural compounds. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Series A*. 2000. Vol. 42. No. 3, pp. 517–529.
10. Белоусов В.П., Морачевский А.Г. Теплоты смешения жидкостей. Л.: Химия, 1999. С. 30.
10. Belousov V.P., Morachevsky A.G. [Heats of mixing of liquids]. Leningrad: Khimiya. 1999, p. 30.
11. Olabisi O. Polymer compatibility by gas-liquid chromatography. *Macromolecules*. 1975. Vol. 8, pp. 316–322.
12. Walsh D.J., McKeown J. G. Compatibility of polyacrylates and polymethacrylates with poly(vinyl chloride): 1. Compatibility and temperature variation. *Polymer*. 1980. Vol. 21. Iss. 11, pp. 1330–1334. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(80\)90203-7](https://doi.org/10.1016/0032-3861(80)90203-7)
13. Wahren D.C., Bernstein R.E., Barlow J.W., Paul D.R. Polymer blends containing poly(vinylidene fluoride). Part IV: Thermodynamic interpretations. *Polymer Engineering & Science*. 1988. Vol. 18, pp. 677. <https://doi.org/10.1002/pen.760181607>
14. Cruz C.A., Barlow J.W., Paul D.R. The basis for miscibility in polyester- polycarbonate blends. *Macromolecules*. 1979. Vol. 12. No. 4, pp. 726–731.
15. Askadskii A.A. Computational Materials Science of Polymers. Cambridge, Cambridge International Science Publishing Ltd. 2003. 695 p.
16. Аскадский А.А., Попова М.Н., Кондращенко В.И. Физико-химия полимерных материалов и методы их исследования: Учебное издание. М.: Издательство АСВ, 2015. 408 с.
16. Askadsky A.A., Popova M.N., Kondrashchenko V.I. Fiziko-khimiya polimernykh materialov i metody ikh issledovaniya: Uchebnoye izdaniye [Physical chemistry of polymeric materials and methods for their research: educational edition]. Moscow: ASV. 2015. 408 p.
17. Rowell R. Chemical modification of wood to produce stable and durable composites. *Cellulose Chemistry and Technology*. 2012. Vol. 46 (7–8), pp. 443–448.
18. Mohamed A.L., Hassabo A.G. Flame Retardant of Cellulosic Materials and Their Composites. 2015. In: Visakh P., Arao Y. (eds) Flame Retardants. Engineering Materials. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03467-6_10
19. Kuzub L.I., Irzhak V.I. Kinetics and mechanism of the late stage of microphase separation induced by curing. *Colloid Journal*. 2000. Vol. 63. Iss. 1, pp. 86–91.
20. Stepina I., Sodomon M., Semenov V. et al. Modifying heracleum sosnowskyi stems with monoethanolamine(N→B)-trihydroxyborate for manufacturing biopositive building materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 170, pp. 45–52. DOI: 10.1007/978-3-030-79983-0_5
21. Степина И.В., Содомон М., Семенов В.С. и др. Повышение биостойкости стеблей борщевика Сосновского в качестве сырья для производства строительных материалов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 2 (746). С. 79–91. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-79-91.
21. Stepina I.V., Sodomon M., Semenov V.S. et al. Improving the biostability of Sosnovsky's hogweed stems as a raw material for the production of building materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2021. No. 2 (746), pp. 79–91. (In Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-79-91

Как подготовить к публикации научно-техническую статью

Журнальная научно-техническая статья – это сочинение небольшого размера (до пяти журнальных страниц), что само по себе определяет границы изложения темы статьи.

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейшего поиска в избранном направлении.

Научные статьи рецензируются специалистами. Учитывая открытость журнала «Жилищное строительство» для ученых и исследователей многих десятков научных учреждений и вузов России и СНГ, представители которых не все могут быть представлены в редакционном совете издания, желательно представлять одновременно со статьей отношение ученого совета организации, где проведена работа, к представляемому к публикации материалу в виде сопроводительного письма или рекомендации.

Библиографические списки цитируемой, использованной литературы должны подтверждать следование автора требованиям к содержанию научной статьи.

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНиПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.

2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.

3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.

4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–3 года в ведущих отраслевых научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние пять лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

ВНИМАНИЕ! С 1 января 2020 г. изменены требования к оформлению статей. Обязательно ознакомьтесь с требованиями на сайте издательства в разделе «Авторам»!

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями изданий:

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом не менее 100 слов на русском и английском языках; подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы», ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания; сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов. Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»[®] был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf

Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства

<http://rifsm.ru/page/7/>

или журнала <http://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>



Технологическая безопасность гипсовой отрасли:

результаты научных исследований

развитие технологии и оборудования

применение гипсовых материалов в строительстве



Редакция научно-технического журнала «Строительные материалы» и Российская гипсовая ассоциация объявляют конкурс научных и научно-практических статей по гипсовой тематике.

В конкурсе принимают участие статьи, опубликованные в течение года с № 8-2022 г. по № 8-2023 г. по темам:

- Результаты научных исследований в области создания новых и оптимизации существующих гипсовых материалов
- Развитие технологии производства гипсовых материалов и изделий
- Техногенные гипсовые отходы и возможность их вовлечения в производство
- Применение гипсовых материалов в строительстве

Объявление итогов конкурса и награждение победителей состоится в рамках 11-й Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»

К участию в конкурсе приглашаются:

магистранты, аспиранты, докторанты, соискатели ученой степени кандидата и доктора наук, сотрудники производственных предприятий и научно-производственные коллективы.

Рукописи статей необходимо представлять в редакцию в соответствии с техническими требованиями (см. раздел «Авторам» на сайте журнала <https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>) с пометкой «На конкурс статей по гипсу».

Крайний срок подачи конкурсных статей 1 июля 2023 г.

Конкурсная комиссия определяет лучшие статьи и объявляет победителей конкурса.

Победители конкурса награждаются ценными подарками, годовой подпиской на журнал «Строительные материалы» на 2024 г. и дипломами лауреата.

Авторам всех конкурсных статей вручаются дипломы участников конкурса.



www.rifsm.ru

www.journal-cm.ru

www.rosgips.ru

(499) 976-20-36, 976-22-08

5-7 апреля 2023 г.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

СПТОКРАНЫ

СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ЦВК ЭКСПОЦЕНТР павильон № 8

