

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] №8



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU АВГУСТ 2023 г. (816)

ГИПС НАША ПРОФЕССИЯ

Ваш надежный партнер – лидер в топ списке поставщиков

Alphaplâtre



✓ Оборудование для гипсовой промышленности и модернизации существующих технологических линий

✓ Индивидуальные технические решения и адаптированный уровень автоматизации

✓ Реактивность. Качество. Надежность

✓ Инновационные решения для удовлетворения ваших потребностей (сокращение энергопотребления, обслуживания, времени монтажа и уменьшение рисков)



✓ Высокие стандарты качества при разумной стоимости инвестиций

✓ Обучение обслуживающего персонала

✓ Помощь на любом этапе вашего проекта



АНЖЕ

15 rue du Moulin des Landes
CS 50159 - Saint Sylvain d'Anjou
49481 Verrières en Anjou Cedex
T: + 33 (0)2 41 21 19 40
F: + 33 (0)2 41 21 19 59
ФРАНЦИЯ

Париж

140 bis rue de Rennes
75006 PARIS
T: + 33 (0)1 53 90 22 40
F: + 33 (0)1 53 90 22 24
ФРАНЦИЯ

МОСКВА

20, Daev pereulok
Daev plaza - office 512
T: + 7 495 604 81 86
F: + 7 495 604 81 73
РОССИЯ

ЦИНДАО

N° 612, Qiganshi
Economic development zone
Rushan City 264500, Shandong
T: + 86 13 701 883 087
КИТАЙ



marianna.d@alphaplatre-france.com

КОМФОРТНЫЙ ДОМ ВМЕСТЕ С КНАУФ



Ремонт и отделка дома или квартиры с материалами КНАУФ – это комплексные решения любой дизайнерской идеи и строительной задачи.

www.knauf.ru
ООО «КНАУФ ГИПС»

KNAUF

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®

№ 8

Основан в 1955 г.

(816) Август 2023 г.

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

Нормативная база отрасли

И.М. СЕБЕЛЕВ, О.Е. СМИРНОВА, О.Н. СОЛОВЬЕВА, С.А. ШАХОВ

Снижение качества строительства вследствие несовершенства нормативной базы 4

Г.С. СЛАВЧЕВА

Анализ российской нормативной документации, регламентирующей применение
и развитие строительных аддитивных технологий 10

Современные вяжущие материалы

С.-А.Ю. МУРТАЗАЕВ, М.Ш. САЛАМАНОВА, З.Ш. ГАЦАЕВ

Влияние активированного бентонита на свойства щелочных вяжущих материалов 18

Научно-практическая конференция «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения
в строительном материаловедении» (Информация) 25

Гипсовые строительные материалы

Я.И. КОСОВ, Д.В. РУМЯНЦЕВ, М.С. ПОПОВ, А.В. ТРОФИМОВ, А.И. ДЕВОЧКИН, В.М. ТОЗИК, А.В. КЕЛЕХСАЕВ

Исследование получения ангидрита из гипса техногенного происхождения и возможность
его использования при производстве закладочных смесей для условий рудников Талнаха 26

С.А. ОТМАН АЗМИ, Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, В.П. ДЕНИСОВ, М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА

Влияние зернового состава заполнителя на свойства штукатурных растворов
на основе композиционного гипсового вяжущего 35

Бетоны: наука и практика

С.В. САМЧЕНКО, М.Г. БРУЯКО, Н.В. НОВИКОВ

Радиационно-защитные свойства ячеистого баритсодержащего бетона 42

М.А. ГОНЧАРОВА, Р.Э. АГАМОВ, А.Г. ЗАЕВА, Г.М. БУТУЗОВ, П.В. МОНАСТЫРЕВ

Механизмы формирования структуры и свойств прессованных мелкозернистых бетонов 48

Результаты научных исследований

С.В. ФЕДОСОВ, М.О. БАКАНОВ

Эволюция математических моделей процессов нестационарной тепло-(массо-) проводности
в телах канонической формы 54

А.В. ПЧЕЛЬНИКОВ, А.П. ПИЧУГИН

Формирование физико-химической структуры лакокрасочных покрытий при их наномодификации 63

В.А. ФЕДОРЦОВ, С.С. ГЛАДКИН, А.П. ФЕДОРЦОВ, В.Т. ЕРОФЕЕВ

Улучшение эксплуатационных свойств цементных композитов комплексными добавками 72

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

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

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 8

Founded in 1955 (816) August 2023

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

Normative base of the industry

- I.M. SEBELEV, O.E. SMIRNOVA, O.N. SOLOVEVA, S.A. SHAKHOV
Decrease in the Quality of Construction Due to the Imperfection of the Regulatory Framework..... 4
- G.S. SLAVCHEVA
Analysis of Russian Regulatory Documents Regulating the use and Development of Building Additive Technologies 10

Modern binding materials

- S-A.Y. MURTAZAEV, M.Sh. SALAMANOVA, Z.Sh. GATSAEV
Influence of Activated Bentonite on the Properties of Alkaline Binders..... 18
- Scientific and Practical Conference "New Progressive Formulation and Technological Solutions
in Building Materials Science" (Information) 25**

Gypsum construction materials

- Ya.I. KOSOV, D.V. RUMYANTSEV, M.S. POPOV, A.V. TROFIMOV, A.I. DEVOCHKIN, V.M. TOZIK, A.V. KELEKSAEV
**Investigation of the Production of Anhydrite from Technogeneous Gypsum and the Possibility
of its Use in the Production of Filling Mixture (Backfill Blend) for the Conditions of the Talnakh Mines 26**
- S.A. OTHMAN AZMI, N.V. CHERNYSHEVA, V.P. DENISOV, M.Yu. DREBEZGOVA
**Influence of the Grain Composition of the Aggregate on the Properties
of Plaster Solutions Based on a Composite Gypsum Binder 35**

Concretes: science and practice

- S.V. SAMCHENKO, M.G. BRUYAKO, N.V. NOVIKOV
Radiation-Protective Properties of Cellular Barite-Containing Concrete 42
- M.A. GONCHAROVA, R.E. AGAMOV, A.G. ZAEVA, G.M. BUTUZOV, P.V. MONASTYREV
Mechanisms for the Formation of the Structure and Properties of Pressed Fine-Grained Concretes..... 48

Results of scientific research

- S.V. FEDOSOV, M.O. BAKANOV
**Evolution of Mathematical Models of Processes of Non-Stationary Heat (Mass) Conduction in Bodies
of Canonical Form..... 54**
- A.V. PHELNIKOV, A.P. PICHUGIN
Formation of the Physical and Chemical Structure of Paint and Varnish Coatings During Their Nano-Modification 63
- V.A. FEDORTSOV, S.S. GLADKIN, A.P. FEDORTSOV, V.T. EROFEEV
Improving the Performance Properties of Cement Composites with Complex Additives 72

Главный редактор:**ЮМАШЕВА Е.И.,**

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

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

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

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

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

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

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

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

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

КОРОЛЕВ Е.В.,

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

КОТЛЯР В.Д.,

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

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

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

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)**РУДАКОВ О.Б.,**

д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

СТРОКОВА В.В.,

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

ТРАВУШ В.И.,

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

ФЕДОСОВ С.В.,

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

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

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

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

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

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

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

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

BURYANOV A.,

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

EROFEEV V.,

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

FEDOSOV S.,

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

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

GORIN V.,

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

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

KOROLEV E.,

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

KOTLYAR V.,

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

LEONOVICH S.,

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

LESOVIK V.,

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

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

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

PUKHARENKO Yu.,

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

RUADKOV O.B.,

Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

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)

STROKOVA V.

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

TRAVUSH V.,

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

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

И.М. СЕБЕЛЕВ¹, д-р техн. наук (isebelev@yandex.ru),
О.Е. СМЕРНОВА¹, канд. техн. наук (smirnova.olj@yandex.ru),
О.Н. СОЛОВЬЕВА¹, канд. техн. наук (fedinaon@mail.ru);
С.А. ШАХОВ², д-р техн. наук (sashakhov@mail.ru)

¹ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН) (630008, г. Новосибирск, ул. Тургенева, 159)

² Сибирский государственный университет путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191)

Снижение качества строительства вследствие несовершенства нормативной базы

Проблема контроля и оценки качества в строительстве приобретает особую актуальность, поскольку в строительном комплексе эффективность служб управления качеством недостаточно высока. На всех этапах жизненного цикла строительной продукции главная цель участников строительного процесса – создание безопасного и надежного объекта капитального строительства, и все действия должны быть направлены на оптимизацию бизнес-процессов и снижение рисков на всех этапах жизненного цикла зданий и пр. В результате исследования действующих нормативных требований к контролю качества в строительстве, в частности к бетону и бетонной смеси, их показателям, допустимым отклонениям и стабильности показателей качества выявлено отсутствие использования статистических инструментов обеспечения стабильности производства бетонных смесей, контроля показателей качества продукции и процессов, производящих продукцию. Также анализировались требования к показателям качества цемента, в частности активность и прочность цемента. Обнаружено, что в последних версиях нормативных документов отсутствуют методы контроля прочности и однородности бетона для достижения постоянства производственного процесса и показателей, принятых для марки бетона. Операционный контроль проводят с заполнением электронных форм, предусмотренных в плане контроля для каждого вида работ и участника строительного процесса, в том числе на основе схем операционного контроля качества технологической документации строительства. Но в нормативном документе не зафиксировано, кто разрабатывает план контроля, опросные листы и в каком объеме и пр. Это необходимо оговаривать в договоре на выполнение работ. В итоге наличие утвержденных и применяемых на добровольной основе стандартов на изготовление и применение строительных материалов, производство строительно-монтажных работ из-за имеющихся недочетов не гарантирует в полной мере создания надежного и безопасного объекта капитального строительства.

Ключевые слова: контроль качества в строительстве, обеспечение стабильности показателей качества, нормативные документы, операционный контроль, статистические инструменты.

Для цитирования: Себелев И.М., Смирнова О.Е., Соловьева О.Н., Шахов С.А. Снижение качества строительства вследствие несовершенства нормативной базы // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 4–9.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-4-9>

I.M. SEBELEV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (isebelev@yandex.ru), O.E. SMIRNOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (smirnova.olj@yandex.ru), O.N. SOLOVEVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (fedinaon@mail.ru); S.A. SHAKHOV², Doctor of Sciences (Engineering) (sashakhov@mail.ru)

¹ Novosibirsk state university of architecture and civil engineering (Sibstrin) (159, Turgeneva Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation)

² Siberian State University of Communications (191, Dusi Kovalchuk Street, Novosibirsk, 630049, Russian Federation)

Decrease in the Quality of Construction Due to the Imperfection of the Regulatory Framework

The problem of quality control and evaluation in construction is becoming particularly relevant today, since the efficiency of quality management services in the construction complex is not high enough. At all stages of the life cycle of construction products, the main goal of the participants in the construction process is to create a safe and reliable capital construction facility, and all actions should be aimed at optimizing business processes and reducing risks at all stages of the life cycle of buildings, etc. The current regulatory requirements for quality control in construction, in particular for concrete and concrete mix, their indicators, permissible deviations and stability of quality indicators were investigated. The absence of the use of statistical tools to ensure the stability of the production of concrete mixtures, control of quality indicators of products and processes producing products has been revealed. The requirements for cement quality indicators, in particular the activity and strength of cement, were also analyzed. It was found that in the latest versions of regulatory documents there are no methods for controlling the strength and uniformity of concrete to achieve the constancy of the production process and the indicators adopted for the concrete grade. Operational control is carried out by filling out electronic forms provided for in the control plan for each type of work and participant in the construction process, including on the basis of operational quality control schemes of technological documentation of construction/ But, the regulatory document does not specify who develops the control plan, questionnaires and in what volume, etc. This must be stipulated in the contract for the performance of work. As a result, the availability of standards approved and applied on a voluntary basis for the manufacture and use of construction materials, the production of construction and installation works due to existing shortcomings does not fully guarantee the creation of a reliable and safe capital construction facility.

Keywords: quality control in construction, ensuring the stability of quality indicators, regulatory documents, operational control, statistical tools.

For citation: Sebelev I.M., Smirnova O.E., Soloveva O.N., Shakhov S.A. Decrease in the quality of construction due to the imperfection of the regulatory framework. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-4-9>

Проблема контроля и оценки качества в строительстве в последнее время приобретает особую актуальность, поскольку в строительном комплексе эффективность служб управления качеством недостаточно высока.

Не следует забывать, что на всех этапах жизненного цикла строительной продукции главная цель всех участников строительного процесса – создание безопасного и надежного объекта капитального строительства (ОКС) и все действия, направленные на

оптимизацию бизнес-процессов и снижение рисков на всех этапах жизненного цикла зданий, способствующих выработке оптимальных решений, выявлению ошибок на ранних стадиях проектирования, снижению затрат на строительство и эксплуатацию, сокращению сроков работ, в том числе при использовании технологии информационного моделирования (ТИМ), должны обеспечить создание безопасно и надежно ОКС [1–5].

Необходимо отметить, что в настоящее время разрабатан и принят свод правил СП 471.1325800.2019 «Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства строительных работ», в п. 3.13 которого дано определение контроля качества производства строительных работ: «Составная часть строительного контроля, целью которой является проверка соответствия показателей качества строительной **продукции и технологий** выполнения строительных процессов установленным требованиям». Из данного определения следует, что строительным контролем охватываются:

- строительная продукция (здание, конструкция) и, следовательно, при этом необходимо определять показатели ее качества;
- технология выполнения строительных процессов и также показатели ее качества.

Общеизвестно, что контроль качества строительных материалов, изделий и конструкций является неотъемлемой частью системы обеспечения надежности конструкций зданий и сооружений. Эффективность, результативность и экономичность контроля качества и испытаний обеспечивается применением статистических методов (ГОСТ Р ИСО 12491–2011 «Материалы и изделия строительные. Статистические методы контроля качества»). Это в полной мере относится к бетону – важнейшему материалу, применяемому в современном строительстве.

Известно, что качество строительства существенным образом зависит от качества нормативной (технические регламенты, стандарты), проектной (в том числе изыскания) и технологической документации, соблюдения технологий производства материалов, изделий, конструкций, строительно-монтажных работ, своевременного контроля качества и реализуется в процессе эксплуатации ОКС.

Рассмотрим с этих позиций нормативные документы, которые в настоящий момент из разряда обязательных перешли в категорию добровольного применения.

В ГОСТ 26633–2015, ГОСТ 31914–2012, ГОСТ 18105–2018, ГОСТ 7473–2010, ГОСТ 27006–2019, как и в предыдущих редакциях, отсутствует определение основного термина: «класс бетона» [6]. Кроме того, в ГОСТ 26633–2015 не устранена возможность назначения проектировщиками «экзотических» значений некоторых показателей качества бетона. Например, в одном из проектов мы встретили такую запись: «Бетонная подготовка – бетон В7,5 F75 W6

ГОСТ 7473–2010». В этом случае для обеспечения нормативной прочности класса согласно ГОСТ 27006–2019 данный бетон должен иметь среднюю прочность при сжатии при коэффициенте вариации $V=13,5\%$, равную $R=9,8\text{МПа}$. Согласно [7] для обеспечения требуемой марки по морозостойкости F75 (по первому методу) необходимо иметь прочность бетона при сжатии не менее 25 МПа, а водонепроницаемости W6 – не менее 35 МПа. Таким образом, даже неспециалисту понятно, что обеспечить требуемую проектом водонепроницаемость W6 при классе бетона В7,5 **нереально** [8].

В ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия» указаны следующие технологические показатели качества: удобоукладываемость; средняя плотность; расслаиваемость; пористость; температура; сохраняемость свойств во времени; объем вовлеченного воздуха.

В зависимости от показателя удобоукладываемости бетонные смеси подразделяют на марки в соответствии с табл. 1–4. В табл. 5 приведены допустимые отклонения заданных значений показателей удобоукладываемости; в табл. 7 допустимые отклонения заданных значений показателей качества бетонной смеси: средняя плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; расслаиваемость, %; пористость, %; температура, $^{\circ}\text{C}$; сохраняемость свойств во времени.

В п. 6.4 указано: «Периодичность контроля показателей качества бетонов и каждой партии бетонных смесей устанавливаются в соответствии с Приложением Г, или она должна соответствовать требованиям, указанным в договоре на поставку бетонной смеси». По Приложению Г технологических показателей качества бетонных смесей определяются: удобоукладываемость в первых трех загрузках в смену и далее в каждой десятой загрузке, средняя плотность – только в первой загрузке в смену. Таким образом, контролю средней плотности бетонной смеси уделяется мало внимания, однако это свойство требует более пристального внимания.

Не подлежит сомнению, что прочность бетона при сжатии взаимосвязана с расходом цемента и его активностью, водоцементным отношением, количеством и соотношением крупного и мелкого заполнителей (щебня/гравия и песка), удобоукладываемостью и средней плотностью бетонной смеси и бетона, расходом различного рода добавок.

Важнейшей операцией приготовления бетонной смеси является перемешивание. Обеспечение качества перемешивания зависит как от конструктивных особенностей (параметров) смесительного оборудования, так и от постоянства режима перемешивания, установленного для данного состава бетона, стабильности соотношения компонентов в процессе их перемешивания (точности их дозирования). При этом постоянство режима перемешивания обеспечивается установленной последовательностью загрузки компонентов в смеситель и продолжительностью их перемешивания.

Мерой стабильности процесса приготовления бетонной смеси является постоянство таких технологических характеристик, как удобоукладываемость, определяемая, например, маркой по осадке конуса, и средняя плотность. Постоянный контроль этих показателей совместно с операционным контролем технологического процесса позволит обеспечить соответствие бетонной смеси требованиям, указанным в договоре на поставку.

Принятое положение (п. 5.3.3) ГОСТ 7473–2010: «Погрешность дозирования исходных материалов весовыми дозаторами не должна превышать $\pm 2\%$ для цемента, воды, химических и минеральных добавок, $\pm 3\%$ – для заполнителей» – не способствует стабилизации процесса приготовления бетонной смеси и ее однородности (ГОСТ 7473–94 п. 4.11 соответственно: $\pm 1\%$ и $\pm 2\%$). Это особенно важно для монолитного строительства, где применяемые бетонные смеси имеют повышенную подвижность и поэтому при дозировании компонентов бетонной смеси необходимо обеспечивать высокую точность дозирования.

В п. 10.5 (ГОСТ 7473–2010) указано: «При оценке стабильности производства соответствие нормируемых технологических показателей качества бетонных смесей заданным значениям проводят по результатам контроля качества смесей за период, не превышающий 6 мес.

Соответствие бетонной смеси заданным значениям устанавливают подсчетом числа результатов, полученных за период оценки, которые находятся за пределами установленных заданных значений, границ классов или допустимых отклонений заданных значений, и сравнением этого числа с приемочным числом, указанным в табл. 8».

При этом не применяются статистические инструменты обеспечения стабильности производства бетонных смесей, контроля показателей качества (ПК) продукции и ПК процессов, ее производящих. Это традиционные методики менеджмента качества: статистический приемочный контроль (СПК) и контрольные карты Шухарта (КК), широко применяемые в современных системах управления предприятием, например ISM, LEAN, 6 SIGM, ISO 9000 и т. п. Статистические методы, предложенные Шухартом, дали в руки специалистов инструмент, который позволил *сосредоточить усилия не на том, как обнаружить и изъять бракованные материалы/изделия до их отгрузки покупателю, а на том, как увеличить выход годной продукции в технологическом процессе.*

При использовании методики контрольных карт внимание персонала обращается не только на текущие показатели качества произведенной в данный момент времени продукции, но и накопленные характеристики этой продукции в течение определенного периода. Если ПК продукции характеризуют ее состояние в определенный момент времени, то ПК процесса показывают, насколько близкими к данным ПК будут ПК другой, порождаемой этим процессом продукции или будут ли будущие ПК

продукции соответствовать настоящим. При этом необходимо осуществлять операционный контроль, который должен обеспечить: на данной операции соблюдение требований нормативно-технической документации (НТД), технологических регламентов и проектной документации; принятие оперативных мер по предупреждению дефектов и отклонений от требований НТД, выявляемых в процессе проверки, и немедленному их устранению; повышение личной ответственности исполнителей.

Таким образом, оценивать стабильность производства бетонных смесей необходимо, по нашему мнению, параллельно отбирая пробы для определения удобоукладываемости и средней плотности по алгоритму, указанному в ГОСТ 7473–2010, Приложение Г, либо в соответствии с технологическим регламентом на производство бетонных смесей, разработанным на предприятии-изготовителе.

В настоящее время действуют следующие стандарты: ГОСТ 30515–2013 «Цементы. Общие технические условия» и ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». Только в ГОСТ 31108–2020 п. 6.2.3.3 с существенной оговоркой указана возможность, но не обязанность (!) цементного завода предоставлять потребителю данные об эффективности цемента при пропаривании каждой производимой им партии цемента: «Пределы прочности на сжатие цемента типов ЦЕМ 0, ЦЕМ I, ЦЕМ II и ЦЕМ III после пропаривания и группы эффективности цемента при пропаривании представлены в Приложении А. Определение группы эффективности цемента при пропаривании выполняется только в том случае, если это предусмотрено договором (контрактом) на поставку цемента». Эта очень важная характеристика цемента необходима не только при производстве сборных бетонных и железобетонных изделий и конструкций, но и для монолитного бетона, так как он также подвергается различным видам тепловлажностной обработки (ТВО) как зимой, так и летом. Если работники лаборатории при производстве сборных бетонных и железобетонных изделий и конструкций непременно прописывают в договоре поставки цемента эту характеристику, то при производстве товарного бетона в большинстве случаев это редкость. Без учета эффективности цемента при пропаривании велика вероятность получить фактический класс бетона по прочности монолитных конструкций в проектном возрасте ниже проектного класса бетона по прочности.

Активность цемента при пропаривании, характеризующая интенсивность твердения бетона на конкретном виде и классе цемента в условиях теплового воздействия, является не нормируемой, а информационной характеристикой, численное значение которой для цемента конкретного завода-изготовителя, как правило, достаточно стабильно. Она обязательно учитывается при назначении составов бетона и режимов тепловой обработки.

Учет активности цемента при пропаривании позволяет заводам ЖБИ оптимизировать составы бетона по расходу цемента и режимы тепловой обработки – по продолжительности и удельному расходу энергоресурсов.

В целях учета активности цемента при пропаривании ранее использовали значение коэффициента его эффективности при тепловой обработке, K_p , который определяется как отношение прочности при пропаривании к прочности цемента в возрасте 28 сут при нормальном твердении. Имеющиеся в справочной литературе более чем тридцатилетней давности данные о K_p для того или иного цементного завода-изготовителя морально устарели и, следовательно, нуждаются в обновлении. Кроме того, практически отсутствуют данные об изменении прочности цемента после пропаривания к возрасту 28 сут [9].

Подбор состава бетона, как правило, выполняется лабораторией изготовителя по утвержденному заданию на подбор состава бетона. Расчет начального основного и нескольких дополнительных составов проводится на основе данных входного контроля качества материалов для бетона. При этом, согласно п. 6.4 ГОСТ 27006–2019 «Бетоны. Правила подбора состава», «активность цемента для расчета начальных составов принимают равной его гарантированной марке (классу)». В соответствии с п. 8.2.2 (табл. 2) ГОСТ 30515–2013 предельное отклонение от требований нормативного документа не более чем на 2,5 МПа является малозначительным дефектом. Таким образом, цементники защитили себя и облегчили себе жизнь, а производители бетонной смеси имеют высокую вероятность колебаний прочности цемента.

ГОСТ 18105 «Бетоны. Правила контроля прочности» имеет уже полувековую историю. Действовавший в 1972 г. стандарт устанавливал методы контроля прочности и однородности на заводах ЖБИ и на заводах по производству готовых бетонных смесей. В нем указывалось, что контроль и оценка прочности и однородности бетона направлены на достижение постоянства производственного процесса и показателей, принятых для данной марки бетона [4]. В ГОСТ 18105–2010 и ГОСТ 18105–2018 о постоянстве производственного процесса уже не упоминается, основная цель — обеспечить значения заданного класса бетона по прочности [11].

В ГОСТ 18105–2018 п. 4.4 (Таблица 1. Требования к контролю по видам нормируемой прочности, примечание № 3) указано: «Если нормируемая отпускная или передаточная прочность бетонных и железобетонных изделий составляет 90% и более значения проектного класса, контроль прочности в проектном возрасте допускается не производить»; таким образом, для монолитных и сборно-монолитных конструкций без предварительного напряжения арматуры в настоящий момент эта норма не действует. В ГОСТ 18105–2010 каких-либо исключений не было. По нашему мнению, необходимо вернуть от-

менную норму, так как ее отсутствие реально приводит к конфликтным ситуациям.

Например, 1–2 декабря на строительстве жилого дома в Новосибирске выполнили бетонирование колонн, диафрагм, перекрытия. В возрасте 28 сут (29–30 декабря) бетон конструкций будет иметь температуру окружающего воздуха: $-20 - -25^{\circ}\text{C}$. Теоретически (ГОСТ 22690–2015 п. 4.10: «Испытания проводят при положительной температуре бетона. Допускается проводить испытания при отрицательной температуре бетона, но не ниже -10°C , при установлении или привязке градуировочной зависимости с учетом требований п. 6.2.4») имеется возможность определить на строительной площадке прочность бетона конструкций в проектном возрасте, а практически это маловероятно. Заказчик при отсутствии результатов определения фактической прочности (фактического класса) бетона вправе не оплатить выполненные подрядчиком работы.

Операционный контроль — основа строительного контроля

В соответствии с СП 48.13330.2019 «СНиП 12-01–2004 «Организация строительства» п. 7.10.1 (редакция без изменения): «Операционный контроль осуществляется постоянно в ходе выполнения строительных процессов в целях своевременного обеспечения соответствия строительных процессов и производственных операций установленным требованиям, в том числе указанным в ИМ, а также выявления причин возникновения отклонений и своевременного принятия мер по их устранению и предупреждению». Кто и в каком объеме устанавливает эти требования, требует уточнения [10].

При этом операционный контроль проводят с заполнением электронных форм, предусмотренных в плане контроля «для каждого вида работ и участника строительного процесса, в том числе на основе схем операционного контроля качества технологической документации строительства» (п. 7.10.2). «При визуальном контроле качества и контроле соблюдения технологии работ на основе технологий информационного моделирования должны быть сформированы и заполнены специальные формы (опросные листы), включающие отметки о соблюдении предусмотренных строительными нормами положений». Система обмена первичной информацией контроля должна предусматривать заполнение и передачу данных в ЦИМ «Строительная модель качества» информации из заполненных форм в электронном виде» (п. 7.6.2). Кто разрабатывает план контроля, опросные листы, в каком объеме, разработана ли «Строительная модель качества» — разработчики данного СП не указывают. Следовательно, это необходимо прописывать в договоре.

В соответствии с п. 9.1.10 «Объем выборки (количественный, например, процентный показатель) при верификации застройщиком (техническим заказчиком) контроля лица, осуществляющего строитель-

ство, виды контроля, контролируемые показатели (включая дополнительные к обязательным) должны быть указаны в составе проектной документации на стадии ее разработки либо определены на стадии строительства по результатам научно-консультационной деятельности специализированной организации, привлеченной для научно-технического сопровождения данного объекта и (или) авторского надзора». Таким образом, на застройщика возлагается обязанность в задании на проектирование указать виды контроля, контролируемые показатели и объем выборки, в том числе при входном контроле.

Согласно п. 9.1.15 СП 48.13330.2019: «При входном контроле применяемых строительных материалов, изделий, конструкций, полуфабрикатов и оборудования лицо, осуществляющее строительство, проводит лабораторные испытания материалов, изделий, полуфабрикатов и оборудования в соответствии с требованиями утвержденной проектной документации».

«Лицо, осуществляющее строительство, выполняет лабораторный контроль для подтверждения физико-механических и иных характеристик материалов, конструкций и изделий в объеме, установленном проектной документацией, а в случае отсутствия таких указаний – в объеме требований документов по стандартизации. Испытания должны выполняться собственной или сторонней строительной лабораторией. Результаты лабораторного контроля должны отображаться в исполнительной документации, в том числе в составе информационной модели объекта» (п. 9.1.46). При этом «места выполнения контрольных операций, их частота, исполнители, методы и средства измерений, формы записи результатов, порядок принятия решений при выявлении несоответствий установленным требованиям должны соот-

ветствовать требованиям нормативных документов и проектной и организационно-технологической документации» (п. 9.1.24).

Следовательно, ненадлежащее исполнение строительного контроля, в том числе лабораторного, приведет к возникновению дефектов и/или аварийной ситуации.

Выводы

1. Наличие утвержденных и применяемых на добровольной основе стандартов (НТД) на изготовление и применение строительных материалов и производство строительно-монтажных работ из-за имеющихся в некоторых из них недочетов не гарантирует в полной мере создания надежного и безопасного ОКС.

2. Строгое соблюдение технологии на стадии подбора состава бетона, технологии его изготовления и контроля с помощью КК и СМК, технологии производства работ при возведении монолитных конструкций, инспекция и осуществление процедур контроля в соответствии с проектной документацией (показатели, объем и место контроля) являются гарантией обеспечения проектной долговечности здания или сооружения. Малоинформативные результаты контроля не являются полноценной доказательной базой для оценки соответствия этапов работ и завершеного объекта установленным требованиям. Усилия участников создания ОКС должны быть сосредоточены на управлении процессами производства, а не только на борьбе с выявляемыми дефектами и несоответствиями.

3. Использование коэффициента КП позволит производителям товарной бетонной смеси и сборных железобетонных конструкций обеспечить гарантированно их высокую однородность по физико-механическим характеристикам.

Список литературы

1. Лapidус А.А., Макаров А.Н. Применение риск-ориентированного подхода при выполнении функций строительного контроля технического заказчика // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 17. Вып. 2. С. 232–241. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.2.232-241>
2. Лapidус А.А., Мотылев Р.В., Сокольников В.В. Формирование методологии детерминированной модели организации строительного производства на основе концепции организационно-технологической платформы строительства // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. Вып. 1. С. 116–131. DOI: [10.22227/1997-0935.2023.1.116-131](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.116-131)
3. Zhou H., Zhao Y., Shen Q., Yang L., Cai H. Risk assessment and management via multi-source information fusion for undersea tunnel construction // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 111, pp. 103050. DOI: [10.1016/j.autcon.2019.103050](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103050)
4. Wang T., Gao S., Li X., Ning X. A meta-network-based risk evaluation and control method for

References

1. Lapidus A.A., Makarov A.N. Application of a risk-based approach when performing the functions of construction control of a technical customer. *Vestnik MUCI*. 2020. Vol. 17, Iss. 2, pp. 232–241. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.2.232-241> (In Russian).
2. Lapidus A.A., Motylev R.V., Sokolnikov V.V. Development of a methodology underlying a deterministic model of construction work arrangements on the basis of the concept of an organizational and technological platform for construction. *Vestnik MUCI*. 2023; 18(1):116-131. (In Russian). DOI: [10.22227/1997-0935.2023.1.116-131](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.116-131)
3. Zhou H., Zhao Y., Shen Q., Yang L., Cai H. Risk assessment and management via multi-source information fusion for undersea tunnel construction. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 111, pp. 103050. DOI: [10.1016/j.autcon.2019.103050](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103050)
4. Wang T., Gao S., Li X., Ning X. A meta-network-based risk evaluation and control method for industrialized

- industrialized building construction projects // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 205, pp. 552–564. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.127
5. Белан В.И., Кудряков А.И., Фишер Г.Б. Контроль качества строительных материалов. *Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов. Сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием (Новосибирск, 18–22 февраля 2019 года)*. Новосибирск, 2019. С. 12–19.
 6. Себелев И.М., Карасев Н.П., Смирнова О.Е. Сравнение оценивания классов по прочности на сжатие цемента и бетона // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 5 (737). С. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-737-5-78-85>
 7. Подмазова С.А. Обеспечение качества бетона монолитных конструкций по прочности, морозостойкости и водонепроницаемости // *ГУП «НИИ Мосстрой», Наука – московскому строительству: Сборник технической информации*. 2007. № 3.
 8. Подмазова С.А., Соколов Б.С., Глушкова М.В., Дмитриев Н.С. Вопросы применения в строительстве российских стандартов, идентичных европейским // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020. № 4 (27). С. 84–96.
 9. Малинина Л.А. К вопросу оценки эффективности цементов для тепловой обработки бетонов // *Бетон и железобетон*. 2007. № 4. С. 9–10.
 10. Подмазова С.А., Глушкова М.В. О необходимости входного контроля бетона на стройплощадке // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2019. № 3 (22). С. 85–89.
5. Belan V.I., Kudryakov A.I., Fischer G.B. Quality control of building materials. *Improving the quality and efficiency of building and special materials. Collection of the National Scientific and Technical Conference with international participation (Novosibirsk, February 18–22, 2019)*. Novosibirsk, 2019, pp. 12–19. (In Russian).
 6. Sebelev I.M., Karasev N.P., Smirnova O.E. Comparison of the assessment of classes on the strength of cement and concrete. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2020. No. 5 (737), pp. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-737-5-78-85> (In Russian).
 7. Podmazova S.A. Ensuring the quality of concrete of monolithic structures in terms of strength, frost resistance and water resistance. *GUP «NIIMosstroy» Nauka – Moskovskomu stroitel'stvu. Sbornik tekhnicheskoi informatsii*. 2007. No. 3. (In Russian).
 8. Podmazova S.A., Sokolov B.S., Glushkova M.V., Dmitriev N.S. Issues of application in construction of Russian standards identical to European ones. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2020. No. 4 (27), pp. 84–96. (In Russian).
 9. Malinina L.A. On the issue of evaluating the effectiveness of cements for heat treatment of concrete. *Beton i Zhelezobeton*. 2007. No. 4, pp. 9–10. (In Russian).
 10. Podmazova S.A., Glushkova M.V. On the need for incoming control of concrete at the construction site. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2019. No. 3, pp. 85–89. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Учебное пособие «Химическая технология керамики»

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

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

Книга «Керамические пигменты»

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

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



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

Г.С. СЛАВЧЕВА, д-р техн. наук (gslavcheva@yandex.ru)

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

Анализ российской нормативной документации, регламентирующей применение и развитие строительных аддитивных технологий

Представлен анализ действующих общестроительных и специальных нормативов с точки зрения их использования для развития строительных аддитивных технологий (АТ). Рассмотрены возможности и ограничения применения в данной области общестроительных нормативов. Показано, что ограничения в применении существующих стандартов технических требований и методов испытаний обусловлены тем, что в них не учитывается слоистость структуры и анизотропия свойств композитов, полученных методом послойной 3D-печати. Проанализировано содержание, выявлены недостатки введенных в действие нормативных документов для строительных аддитивных технологий. Обозначены направления развития нормативной базы в области строительных АТ. Показано, что первоочередные вопросы нормирования связаны с определением требований к комплексу технологических характеристик смесей, параметрических рядов свойств материалов, методами испытаний и контроля их качества; с определением требований к комплексу расчетных сопротивлений слоистых композитов с учетом анизотропии их прочностных характеристик. Для реализации потенциала аддитивных технологий одновременно необходимо решение вопросов проектирования и расчета бионических пустотелых 3D-печатных конструкций с заданной несущей способностью. Это обеспечит переход от традиционных полнотелых строительных конструкций к пустотелым, в которых материал будет располагаться только по линиям действующих напряжений, а его объем составит не более 10–20% от объема конструкции.

Ключевые слова: аддитивные технологии, строительство, нормирование, технические требования, методы испытаний.

Работа выполнена при поддержке Российской академии архитектуры и строительных наук (Государственное задание плана фундаментальных исследований РААСН на 2021–2023 гг., тема 3.1.1.2 «Строительная механика и материаловедение 3D-печатных композитов»), Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства.

Для цитирования: Славчева Г.С. Анализ российской нормативной документации, регламентирующей применение и развитие строительных аддитивных технологий // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 10–17.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-10-17>

G.S. SLAVCHEVA, Doctor of Sciences (Engineering) (gslavcheva@yandex.ru)

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (84 20-letija Octjabrja Street, Voronezh, 394006, Russian Federation)

Analysis of Russian Regulatory Documents Regulating the use and Development of Building Additive Technologies

An analysis of the current general construction and special standards is presented, from the point of view of their use for the development of building additive technologies (AT). The possibilities and limitations of the application of general construction standards in this area are considered. It is shown that the limitations in the application of existing standards of technical requirements and test methods are due to the fact that they do not take into account the layered structure and anisotropy of the properties of composites obtained by layer-by-layer 3D printing. The content is analyzed, shortcomings of the normative documents put into effect for building additive technologies are revealed. The directions for the development of the regulatory framework in the field of building AT are outlined. It is shown that the primary issues of regulation are related to the definition of requirements for the complex of technological characteristics of mixtures, parametric series of material properties, methods of testing and quality control; determination of requirements for the set of design resistances of layered composites, taking into account the anisotropy of their strength characteristics. To realize the potential of additive technologies, it is simultaneously necessary to solve the issues of design and calculation of bionic hollow 3D printed structures with a given bearing capacity. This will ensure the transition from traditional solid building structures to hollow ones, in which the material will be located only along the lines of acting stresses, and its volume will be no more than 10–20% of the structure volume.

Keywords: additive technologies, construction, rationing, technical requirements, test methods.

The work was supported by the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (State assignment plan Fundamental Research of the RAASN for 2021–2023, topic 3.1.1.2 “Structural mechanics and materials science of 3D-printed Composites”), the Ministry of Construction and Housing and Communal Services.

For citation: Slavcheva G.S. Analysis of the Russian regulatory documentation regulating the use and development of construction additive technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 10–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-10-17>

Аддитивное возведение строительных объектов методом послойной 3D-печати определяет следующие параметры материалов и конструкций, принципиально отличающиеся от традиционных:

1) технологические характеристики смесей должны обеспечивать формирование и сохранность структуры изделий, конструкций без формы или опалубки;

2) структура затвердевшего материала отличается слоистостью, что предполагает воздействие межслойных эффектов на проявление свойств;

3) возможность создания пустотелых бионических конструкций, что предполагает сочетание свободы внешней формы и организованного внутреннего пространства, в котором масса материала

располагается только по линиям действующих напряжений.

Требования к *технологическим характеристикам смесей* в мировой практике сформировались на основе изучения и моделирования поведения вязкопластичных смесей в технологических процессах 3D-печати [1–6]. В настоящее время общепризнано, что основными технологическими характеристиками смесей для 3D-печати являются перекачиваемость (pumpability) [1], экструдированность (extrudability) [2, 3, 6], формоустойчивость (shape retention – способность экструдированного материала сохранять свое поперечное сечение равным поперечному сечению сопла), работоспособность (buildability, workability – способность слоя держать форму под давлением вышележащих слоев) [2–5], способность к сохранности свойств (open time) [3] и скорость твердения (structural build up) [2, 3]. Несмотря на большой объем выполненных исследований, существуют разночтения в использовании моделей реологического поведения смесей, а количественные значения технологических характеристик зависят от методов их оценки, которые, как правило, не нормированы. В связи с этим трудно точно интерпретировать физический смысл и соответственно однозначно трактовать используемые значения технических требований к параметрам смесей.

Структура печатных композитов в конструкциях определяется двумя типами слоистости. Укладка последующего слоя поверх предыдущего создает горизонтальную слоистость. Если следующий слой укладывается рядом с предыдущим слоем на том же уровне, то создается и вертикальная и горизонтальная слоистость.

Установлено [7–17], что воздействие межслоевых эффектов на горизонтальных или вертикальных границах раздела слоев определяет отличия в значениях прочности при действии нагрузки параллельно (R_{Cx}) и перпендикулярно (R_{Cy}) слоям. Для слоистых печатных композитов характерна ярко выраженная анизотропность их прочностных характеристик, которые одновременно ниже, чем прочность материала слоя (R_C):

$$R_{Cx} \neq R_{Cy} < R_C.$$

В обзоре Rehman A.U. and Kim J.H. [1] обобщены и сопоставлены данные нескольких десятков исследований, согласно которым приведены соотношения между прочностью печатных слоистых композитов вдоль слоев (R_{Cx}) и перпендикулярно (R_{Cy}) слоям и прочностью материала слоя (R_C). При этом диапазон вариативности данных соотношений для результатов разных исследований очень значителен и составляет для прочности:

- при сжатии $R_{Cx}/R_{Cc}=0,5–1,1$; $R_{Cy}/R_{Cc}=0,6–1,1$;
- при изгибе $R_{fx}/R_{fc}=0,3–0,9$; $R_{fy}/R_{fc}=0,9–1,3$;
- при растяжении $R_{tx}/R_{tc}=0,8–1,5$; $R_{ty}/R_{tc}=0,3–0,5$.

Существенная вариативность в данных различных исследований может быть обусловлена в том

числе отсутствием единых методик испытаний на прочность печатных композитов с учетом их слоистости и анизотропии. Для обеспечения слоистости при изготовлении образцов может быть использована послойная укладка в формы или выпиливание образцов нужного размера из напечатанного элемента [8, 10–13]. Размер образцов в каждом отдельном случае существенно отличается и выбирается исходя из условий проведения опыта, характеристик смесей, особенностей местной нормативной базы. При испытаниях на прочность при сжатии и изгибе реализуют три способа приложения нагрузки для образцов одной серии: вдоль, перпендикулярно и параллельно печатным слоям [9, 14–17]. При испытаниях прочности сцепления слоев используют осевое растяжение (нагрузка направлена перпендикулярно печатным слоям), раскалывание и сдвиг (нагрузка прикладывается по стыку параллельно печатным слоям) [10–13].

С точки зрения проектирования в настоящее время сложилось противоречие между традиционными методами расчета и проектирования полнотелых конструкций и необходимостью новых методов расчета и проектирования пустотелых 3D-печатных конструкций бионического типа. На практике реализуется процесс адаптации возможностей аддитивных технологий к традиционным методам проектирования, расчета и технологиям возведения зданий, когда роботизированная 3D-печать в строительных объектах используется только для возведения оболочки вертикальных конструкций, преимущественно стен, армирование и отделка которых осуществляются традиционным ручным способом. За исключением стен, остальные конструкции данных объектов (перекрытия, балки, лестницы и т. д.), как правило, также изготавливаются по традиционной технологии бетонного литья. Причиной такого положения в определяющей мере является отсутствие нормативной базы в области расчета и проектирования пустотелых конструкций нового типа. Это существенно ограничивает реализацию потенциала аддитивных технологий (АТ) в сфере строительства.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что для снятия ограничений в развитии строительных АТ необходимо создание эффективной нормативной базы, учитывающей особенности строительного процесса, материалов и способов контроля их качества.

Анализ применимости общестроительных нормативов для аддитивных технологий

В рамках данного анализа перечень действующих нормативных документов разделен на три группы в соответствии с назначением и областью применения (см. таблицу).

1. *Стандарты общих требований и технических условий.* Стандарты технических условий на сухие строительные смеси в целом применимы, но требуют дополнения и актуализации в части внесения

**Применимость общестроительных нормативов для аддитивных технологий
General construction standards adaptability for the additive technologies**

Область применения норматива	Наименование стандарта	Применимость для строительных АТ
Стандарты общих требований и технических условий		
Смеси	ГОСТ 31189–2003. Смеси сухие строительные. Классификация	Требует дополнения для АСП
	ГОСТ 31357–2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем	
	ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия	Неприменим
Бетоны	ГОСТ 4.212–80. Система показателей качества продукции. Строительство. Бетоны	Применим
	ГОСТ 26633–2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия	Частично применим
	ГОСТ 25820–2000. Бетоны легкие. Технические условия	
Стандарты методов испытаний		
Смеси	ГОСТ 31356–2007. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний	Неприменим
	ГОСТ 10181–2014. Смеси бетонные. Методы испытаний	
Бетоны. Механические свойства и выносливость	ГОСТ 10180. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам	Частично применим. Необходимо уточнение методов изготовления, формы и размера образцов для проведения испытаний
	ГОСТ 5802. Растворы строительные. Методы испытаний	
	ГОСТ 18105. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности	
	ГОСТ 22783. Бетоны. Метод ускоренного определения прочности на сжатие	
	ГОСТ 22904. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры	
ГОСТ 24452. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона	ГОСТ 24545. Бетоны. Метод испытаний на выносливость	Применим
Бетоны. Деформативные характеристики	ГОСТ 24544. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести	Частично применим. Необходимо уточнение методов изготовления, формы и размера образцов для проведения испытаний
	ГОСТ 29167. Бетоны. Методы определения трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении	
Бетон. Физические свойства	ГОСТ 12730.1. Бетоны. Метод определения плотности	Применим
	ГОСТ 12730.4. Бетоны. Методы определения показателей пористости	
Бетоны. Морозостойкость	ГОСТ 12730.2. Бетоны. Метод определения влажности	Частично применим. Необходимо уточнение методов изготовления, формы и размера образцов для проведения испытаний
	ГОСТ 12730.3. Бетоны. Метод определения водопоглощения	
	ГОСТ 12730.5. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости	
Бетоны. Показатели эксплуатационной стойкости	ГОСТ 10060. Бетоны. Методы определения морозостойкости	Применим
	ГОСТ 10060.1. Базовый метод определения морозостойкости	
	ГОСТ 10060.2. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании	
	ГОСТ 10060.4. Бетоны. Структурно-механический метод ускоренного определения морозостойкости	
	ГОСТ 10060.3. Бетоны. Дилатометрический метод определения морозостойкости	
Бетоны. Показатели эксплуатационной стойкости	ГОСТ 26134. Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости	Применим
	ГОСТ 13087. Бетоны. Методы определения истираемости.	
	ГОСТ 7076. Материалы строительные. Метод определения теплопроводности	
	ГОСТ 25898. Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропропитанию	
	ГОСТ 20910. Бетоны жаростойкие. Технические условия	
ГОСТ 27296 (СТ СЭВ 4866). Защита от шума в строительстве. Звукоизоляция ограждающих конструкций. Методы измерения		
Нормативы, регламентирующие проектирование и строительство		
Проектирование	ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения	Применим
	СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83	Применим
	СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции	Частично применим
	СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции	Требует дополнения для АСП
Технология и организация строительства	СП 48.13330.2019. Свод правил. Организация строительства	Применим
	СП 435.1325800.2018. Конструкции бетонные и железобетонные монолитные. Правила производства и приемки работ	Неприменим

в классификацию и добавления отдельных требований к смесям для АТ. ГОСТ 7473–2010, регламентирующий требования к бетонным смесям, неприменим, так как перечень и параметрические ряды их характеристик отвечают технологии традиционного бетонного литья в формы и опалубку, а не безопалубочной 3D-печати. Стандарты технических требований для тяжелых, мелкозернистых и легких бетонов можно использовать для установления требований к материалу единичного печатного слоя. В связи с существенной анизотропией свойств для слоистых композитов, полученных по аддитивной технологии, необходима разработка или новых параметрических рядов для нормируемых характеристик, или введение масштабных коэффициентов для них.

2. *Стандарты методов испытаний.* Нормированные методы испытаний сухих смесей, бетонных смесей и строительных растворов неприменимы, так как перечень контролируемых технологических характеристик и процедуры их оценки не соответствуют особенностям технологии строительных АТ. Стандарты на методы испытаний затвердевших бетонов и растворов, в которых используются малые образцы или значение контролируемых характеристик не зависит от формы и размера образца, применимы полностью. Стандарты, в которых значение контролируемых характеристик существенно зависит от формы и размера образца, применимы в части процедур испытаний, применяемого оборудования. При этом необходимо уточнение методов изготовления, формы и размера образцов для проведения испытаний. Должны быть учтены слоистость структуры затвердевших материалов и усредненные толщины печатного слоя изделий и конструкций, произведенных по технологии АТ. При этом все действующие стандарты методов испытаний можно использовать для установления уровня свойств материала единичного печатного слоя.

3. *Нормативы, регламентирующие проектирование и строительство.* Полностью применимы нормативы, которые устанавливают общие принципы обеспечения надежности строительных конструкций и оснований, правила организации строительных процессов. СП 63.13330.2018, устанавливающий правила проектирования конструкций, применим в случае, когда напечатанная часть конструкции используется только в качестве несъемной опалубки, а конструктивные функции выполняет арматура и бетон внутри печатной оболочки. Для пустотелых конструкций, произведенных аддитивным методом, применимость нормированных методов проектирования нуждается в изучении. СП 70.13330.2012, устанавливающий правила производства и приемки работ при возведении различных видов конструкций, зданий и сооружений, нуждается в дополнении и введении раздела, регламентирующего строительные работы для АТ. СП 435.1325800.2018, устанавливающий правила производства, контроля и приемки работ при строи-

тельстве зданий и сооружений из монолитных конструкций, неприменим в связи с принципиальными отличиями технологий монолитного строительства и строительных АТ.

Анализ введенных в действие

нормативных документов для строительных АТ

В настоящее время введено в действие три национальных стандарта (ГОСТ Р) и один предварительный национальный стандарт (ПНСТ).

1. *ГОСТ Р 59095–2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения».* Область применения данного стандарта позиционируется в рамках установления «терминов, определения понятий в области материалов, используемых в технологиях аддитивного строительного производства, которые основаны на аддитивном принципе изготовления строительных конструкций». Стандарт регламентирует 74 термина и их определения «для применения в проектной, рабочей и технической документации всех видов, научно-технической, учебной и справочной литературе».

Из 74 терминов вновь вводимыми и относящимися к технологии аддитивного производства являются девять терминов из группы «Основные термины» (№ 1–9) и два термина из группы «Технология и организация строительного производства» (№ 18, 20). Остальные 63 термина являются общестроительными, и их определения регламентированы ранее в общестроительных стандартах, таких как ГОСТ 26633–2015, ГОСТ 25820–2000, ГОСТ 7473–2010, ГОСТ 31189–2003, ГОСТ 31357–2007, ГОСТ 24211–2003, ГОСТ 10180–90, ГОСТ 22690–88, ГОСТ 18105–2018, ГОСТ 28570–90, СП 48.13330.2019, ГОСТ 4.212–80 (см. таблицу). Для терминов 11, 12, 14–17, 19, 21, 24, 25, 30–35, 40, 44, 51, 53–59, 62–66, 68–74 отличие от существующих, ранее утвержденных и нормированных их определений заключается только в добавлении слов «аддитивное строительное производство (АСП)». Для терминов 10, 13, 22, 26–29, 36, 37, 39, 41–43, 45, 46, 47–49, 60, 61, 67 такие отличия отсутствуют. Однако в анализируемом ГОСТ Р 59095–2020 ссылка на использование аналогичных терминов в ранее утвержденных стандартах дана только для определения термина «бетон» (№ 23) и термина «класс точности» (№ 52).

Ряд приведенных иноязычных (английских) эквивалентов стандартизованных терминов является буквальным неудачным переводом русских терминов и не соответствует международной общепринятой терминологии. К ним относятся:

- «construction 3D printing» – принято «3D-build printing»;
- «construction 3D printer» – принято «3D-build printer»;
- «bonding layer» – принято «casting layer»;
- «concrete mix for AMC» – принято «3D-printable materials», «3D-printable concrete», «3D-printable mixture».

Таким образом, ГОСТ Р 59095–2020 создает терминологическую путаницу, поэтому нуждается в пересмотре.

2. *ГОСТ Р 59097–2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования».* Область применения данного стандарта позиционируется в рамках установления технических требований и правил приемки «материалов для аддитивного строительного производства (АСП), применяемых при строительстве, реконструкции и ремонте зданий и сооружений». Стандарт включает десять разделов: 1) область применения; 2) нормативные ссылки; 3) термины и определения; 4) общие технические требования; 5) производство материалов для аддитивного строительного производства; 6) правила приемки; 7) методы испытаний и процедуры контроля; 8) поставка материалов для аддитивного производства; 9) транспортирование; 10) гарантии производителя (поставщика).

Данная структура стандарта не соответствует традиционной структуре стандартов группы «Технические требования», так как не содержит разделов, регламентирующих:

– классификацию сухих смесей, растворных (бетонных) смесей, а также затвердевшего бетона (строительного раствора) для АСП;

– требования к сырьевым материалам (представлены в разделе «Общие технические требования»);

В разделе «Общие технические требования» не представлены конкретные численные значения и параметрические ряды показателей качества сухих смесей, растворных (бетонных) смесей, а также затвердевшего бетона (строительного раствора) для АСП. Для требований к показателям качества растворных (бетонных) смесей указывается, что такие требования содержатся «в нормативных документах или технической документации на материалы для АСП конкретных видов в зависимости от их назначения». Непонятно, какие конкретно документы нужно использовать.

Для требований к показателям качества затвердевшего бетона (строительного раствора) предлагается использовать параметрические ряды, установленные в действующих стандартах на бетоны, теплоизоляционные и конструкционно-теплоизоляционные материалы. Установленное в мировой практике существенное отличие прочностных характеристик традиционных бетонов от аналогичных характеристик слоистых печатных бетонов не учитывается, свойства последних предлагается оценивать без учета их слоистости. Однако существенная анизотропия свойств вдоль и поперек печатных слоев вызывает необходимость определить ограничения применимости для слоистых бетонов, полученных по технологии АСП, показателей качества, установленных в общестроительных нормативах для традиционных бетонов. Более того, параметрические ряды показателей всех свойств слоистых бетонов также требуют уточнения.

В разделе «Методы испытаний и процедуры контроля» в отличие от общепринятой практики не приведен конкретный перечень характеристик, подлежащих контролю.

Таким образом, в связи с отсутствием конкретных требований к численным значениям, параметрическим рядам для показателей качества растворных (бетонных) смесей, а также затвердевшего бетона (строительного раствора) для АСП вызывает сомнения пригодность ГОСТ Р 59097–2020 для строительной практики.

3. *ГОСТ Р 59096–2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний».* Область применения данного стандарта позиционируется в регламентации методов определения «основных показателей качества материалов для АСП в форме сухих смесей, растворных (бетонных) смесей, а также затвердевшего бетона (строительного раствора)». Стандарт включает семь разделов: 1) область применения; 2) нормативные ссылки; 3) термины и определения; 4) общие положения; 5) определение стойкости к оплыванию; 6) определение прокачиваемости; 7) определение прочности сцепления слоев (сплошность).

В разделе «Общие положения» изложены общие требования к качеству материалов для АСП и методам их испытаний в состоянии сухой смеси, готовых к применению подвижных смесей и затвердевшего раствора (бетона). При этом не регламентируются значения данных характеристик, а дается отсылка к действующим национальным стандартам на другие виды строительных материалов и методам их испытаний.

Качество готовых к применению подвижных смесей регламентируется оценивать через контроль подвижности, сохраняемость первоначальной подвижности, стойкость к оплыванию, прокачиваемость, сроки начала и окончания схватывания, водоудерживающую способность. К данному перечню технологических характеристик смесей имеются следующие принципиальные замечания.

Из принятых в современной мировой практике технологических характеристик смесей (перекачиваемость, экструдированность, формоустойчивость, работоспособность и скорость твердения) ГОСТ 59096–2020 предлагает оценивать только прокачиваемость, стойкость к оплыванию, сроки начала и окончания схватывания. Этого явно недостаточно для полной оценки технологического качества смеси и не соответствует мировой практике. Марка по подвижности противоречит самой идее технологии 3D-печати, в рамках которой смесь должна обладать не подвижностью (необходимой для заполнения формы и/или опалубки в технологии бетонного литья), а, напротив, формоустойчивостью для обеспечения безопалубочного возведения объектов. При оценке стойкости к оплыванию (как оценке формоустойчивости) регламентируется, что «смесь считается стойкой к оплыванию, если изменение размера по ширине напечатанной смесью

призмы $s \times h \times l = 100 \times 50 \times (100 - 900)$ мм в течение 60 с после нанесения не превышает 5 мм». Непонятно, чем обусловлен такой выбор размера образца, ведь сечение печатного слоя в промышленных установках, как правило, находится в диапазоне $s = h = (30 \times 30 - 60 \times 60)$ мм. Регламентируемый предел оплывания слоя высотой 50 мм не более 5 мм за 60 с под собственным весом свидетельствует о полной неспособности смеси держать форму, т. е., напротив, о непригодности к безоплывочной печати.

Одновременно возникают вопросы, в связи с чем качество затвердевшего раствора (бетона) для АТ регламентируется только пятью показателями, в то время как, согласно ГОСТ 4.212–80, для традиционных бетонов установлено 19 показателей назначения. При этом требования к особенностям испытаний свойств затвердевшего раствора (бетона), полученных аддитивным методом, специально не регламентированы, дается отсылка на действующие стандарты на методы испытаний бетонов, что требует уточнения границ применимости. В стандартных методах испытаний используются монолитные образцы размером от 50×50 до 200×200 мм. Бетоны в 3D-печатных конструкциях имеют слоистую структуру, а не монолитную, толщина печатного слоя находится в диапазоне $(30 \times 30 - 60 \times 60)$ мм. Это требует учета при оценке всего комплекса свойств затвердевшего раствора (бетона), полученного аддитивным методом.

Таким образом, представленные в данном ГОСТе требования к методам оценки технологических характеристик смесей и свойств затвердевшего бетона являются неполными и не соответствуют мировой практике. Стандарт нуждается в пересмотре.

ПНСТ 495–2020 (449–2020)¹ «Строительные работы и типовые технологические процессы. Аддитивные технологии. Применение трехмерной печати (3D-печать) в строительстве. Общие требования». Область применения данного предварительного стандарта позиционируется в рамках «правил выбора и применения аддитивных технологий (АТ) в строительстве и устанавливает общие требования к применению трехмерной печати (далее – 3D-печать)». Стандарт включает семь разделов и приложение: 1) область применения; 2) нормативные ссылки; 3) термины, определения и сокращения; 4) общие требования по применению аддитивных технологий в строительстве; 5) общие требования к выбору аддитивных технологий в строительстве и к 3D-принтерам; 6) общие требования при выполнении работ с применением аддитивных технологий; 7) требования безопасности при работе с 3D-принтером, Приложение А (справочное) «Применяемые материалы для аддитивных технологий в строительстве».

Разделы № 4, 5, 7 в целом являются хорошо структурированными, содержат достаточно полные данные, требования и характеристики компонентов ад-

дитивных технологий, соответствующие современному уровню развития данных технологий.

Разделы № 2, 3, 6 и Приложение А нуждаются в дополнениях. Раздел 2 «Нормативные ссылки» может и должен быть дополнен после формирования нормативной базы в области АСП, каковая на данный момент практически отсутствует. Раздел 3 «Термины, определения и сокращения» также нуждается в дополнении с точки зрения более четкого определения видов и классификации, материалов для АСП, строительных процессов АСП, строительных объектов, изделий и конструкций. Раздел 6 «Общие требования при выполнении работ с применением аддитивных технологий» нуждается в дополнении с точки зрения детализации перечня требований к выполнению строительных работ – приготовлению смесей, технологических режимов печати, армирования, отделки.

Приложение А нуждается в существенной переработке с точки зрения установления более четкой классификации сырьевых материалов, сухой смеси, готовых к применению подвижных смесей и затвердевшего раствора (бетона). Пункт А.6 «Требования к готовым изделиям» Приложения содержит перечень требований к затвердевшему материалу, а не к изделиям.

В целом Предварительный национальный стандарт может быть признан в качестве основы для разработки Национального стандарта (ГОСТ Р), устанавливающего общие требования для строительных АТ.

Направления развития нормативной базы в области строительных АТ

Для их внедрения и расширения применения на практике нуждаются в научной и опытной проработке следующие группы первоочередных вопросов:

1. Определение требований к комплексу технологических характеристик смесей для 3D-печати, процедурам контроля их приготовления, методам испытаний и контроля их качества.
2. Определение значений, обоснование параметрических рядов свойств 3D-печатных композитов с учетом их слоистости.
3. Определение требований к методам испытаний свойств 3D-печатных композитов с учетом их слоистости.
4. Определение требований к комплексу расчетных сопротивлений 3D-печатных композитов с учетом анизотропии их прочностных характеристик.
5. Разработка теоретических подходов и численных методов проектирования бионических пустотелых 3D-печатных конструкций с заданной несущей способностью.

На основании полученных результатов станет возможной разработка следующего комплекса нормативных документов, обеспечивающих применимость строительных АТ:

¹ ПНСТ имеет номер 495–2020 в полнотекстовой версии, представленной в «Электронном фонде правовых и нормативно-технических документов». В реестре официального сайта Росстандарта данный ПНСТ имеет номер 449–2020.

1) стандарты, регламентирующие общие технические требования к материалам, содержащие требования к номенклатуре и значениям технологических характеристик смесей и композитов для 3D-печати;

2) стандарты на методы испытаний и контроля качества смесей и композитов, устанавливающих требования к процедурам контроля их приготовления, оценке соответствия показателей качества, методам испытаний технических свойств (в части уточнений методов изготовления, формы и размера образцов слоистых композитов);

3) строительные правила, регламентирующие производство и приемку работ при возведении строительных объектов аддитивным методом, устанавливающие требования к скорости, температурно-влажностным режимам 3D-печати, уходу за напечатанными строительными конструкциями и т. д.;

4) нормативы на методы расчета и проектирования бионических пустотелых 3D-печатных конструкций, устанавливающие требования к их классификации, типам, общим техническим требованиям, правилам расчета и проектирования, способам армирования и т. д.

Выводы

1. Анализ действующих общестроительных и специальных нормативов с точки зрения их использования для развития строительных аддитивных технологий показал их ограниченную применимость в данной области.

2. В российских стандартах не учитываются принятые в современной мировой практике основные технологические характеристики смесей для 3D-печати: перекачиваемость (pumpability), экструдированность (extrudability), формоустойчивость (shape retention – способность экструдированной смеси сохранять свое поперечное сечение равным поперечному сечению сопла), работоспособность (buildability, workability – способность слоя держать форму под давлением вышележащих слоев), способность к сохранности свойств (open time) и скорость твердения (structural build up). В российских стандартах к технологическим характеристикам отнесены только прокачиваемость, сроки начала и окончания схватывания, стойкость к оплыванию под собственным весом. При этом методы оценки данных свойств плохо соотносятся и с технологией 3D-печати, и с мировым опытом исследований и разработок.

3. Существующие стандарты технических требований и методов испытаний всех свойств строительных материалов основаны на регламентации и оценке свойств материалов монолитной структуры. Слоистые 3D-печатные композиты имеют существенную анизотропию свойств вдоль и поперек слоев, возможно развитие деформаций и напряжений между слоями при действии эксплуатационных нагрузок. Поэтому эксплуатационное поведение печатных композитов может существенно отличаться от такого поведения традиционных строительных

материалов. Слоистость структуры и анизотропию свойств принципиально важно учесть при определении параметрических рядов и нормировании расчетных характеристик, используемых при проектировании конструкций. Также это необходимо учитывать и нормировать для проведения испытаний.

4. Применительно к возможностям строительных аддитивных технологий необходима разработка новых способов проектирования конструкций. Это необходимо, чтобы перейти от традиционных полнотелых строительных конструкций к пустотелым, в которых материал будет располагаться только по линиям действующих напряжений, а его объем составит не более 10–20% от объема конструкции.

Список литературы / References

1. Rehman A.U., Kim J.H. 3D concrete printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 14. DOI: 10.3390/ma14143800
2. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V.N., Fataei S., Wolfs R.J.M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*. 2020. No. 132. 106037. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106037
3. Perrot A., Pierre A., Nerella V.N., Wolfs R.J.M., Keita E., Nair S.A.O., Neithalath N., Roussel N., Mechtcherine V. From analytical methods to numerical simulations: A process engineering toolbox for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*. 2021. No. 122. 104164. DOI: 10.1016/j.cemcomp.2021.104164
4. Liu Z., Li M., Weng Y., Wong T. N., Tan M. J., Mixture Design Approach to optimize the rheological properties of the material used in 3D cementitious material printing. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 198, pp. 245–255. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.252
5. Panda B., Mohamed N.A. N., Paul S.C., Singh G.V.P.B., Tan M.J., Šavija B. The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 13. DOI: 10.3390/ma12132149
6. Roussel N., Bessaies-Bey H., Kawashima S., Marchon D., Vasilic K., Wolfs R. Recent advances on yield stress and elasticity of fresh cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2019. No. 124. 105798. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105798
7. Song H., Li X. An overview on the rheology, mechanical properties, durability, 3D printing, and microstructural performance of nanomaterials in cementitious composites. *Materials*. Vol. 14. No. 11. DOI: 10.3390/ma14112950
8. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T. Hardened properties of

- high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012. No. 42 (3), pp. 558–566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003
9. Wang L., Jiang H., Li Z., and Ma G. Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structure with hollow section. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 20. No. 1. DOI: 10.1007/s43452-020-00017-1
 10. Chen Y., Jansen K., Zhang H., Romero Rodriguez C., Gan Y., Çopuroğlu O., Schlangen E. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 262. 120094. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094
 11. Marchment T., Sanjayan J., Xia M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification. *Materials & Design*. 2019. No. 169. 107684. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107684
 12. Keita E., Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin, P., Roussel N. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin. *Cement and Concrete Research*. 2019. No. 123. 105787. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105787
 13. Zareiyan B., Khoshnevis B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete. *Automation in Construction*. 2017. No. 83, pp. 212–221. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.019
 14. Panda B., Chandra Paul S., Jen Tan M. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*. 2017. Vol. 209, pp. 146–149. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.07.123
 15. Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tay Y.W.D., Tan M.J. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar. *Measurement (Lond)*. 2017. Vol. 113, pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.051
 16. Paul S.C., Tay Y.W.D., Panda B., Tan M.J. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18. No. 1, pp. 311–319. DOI: 10.1016/j.acme.2017.02.008
 17. Ducoulombier N., Demont L., Chateau C., Bornert M., Caron J.F. Additive manufacturing of anisotropic concrete: A flow-based pultrusion of continuous fibers in a cementitious matrix. *Procedia Manufacturing*. 2020. No. 47, pp. 1070–1077. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.117

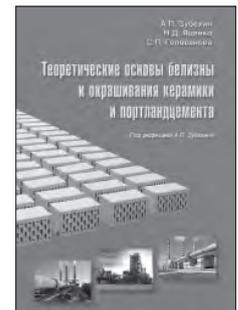
СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»

Авторы – Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П.

В книге представлены теоретические основы белизны и окрашивания керамических строительных материалов и белого портландцемента (БПЦ) с позиции теории цветности силикатных материалов в зависимости от их фазово-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных или восстановительных).

Установлены закономерности зависимости белизны, цвета и особенности окрашивания как пигментов, так и твердых растворов бесцветных фаз ионами-хромофорами от структуры, изovalентного или гетерovalентного изоморфизма, образования окрашивающих кластеров. Разработаны эффективные способы управления белизной и декоративными свойствами строительных керамических материалов (фарфора, фаянса, облицовочной плитки, кирпича) и белого портландцемента.



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.



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

С.-А.Ю. МУРТАЗАЕВ^{1,2}, д-р техн. наук (s.murtazaev@mail.ru),
М.Ш. САЛАМАНОВА^{1,2}, д-р техн. наук (madina_salamanova@mail.ru),
З.Ш. ГАЦАЕВ^{1,2}, инженер (gacaev_195@mail.ru)

¹ Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова (364021, г. Грозный, пр. Исаева, 100)

² Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (364051, г. Грозный, Старопромысловское ш., 21а)

Влияние активированного бентонита на свойства щелочных вяжущих материалов

С развитием промышленности строительных материалов предприняты значительные усилия для получения высокопрочных и долговечных композитов с использованием минеральных порошков, нанодобавок, суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов и др., существенно улучшающих свойства и структуру бетона, повышая тем самым в 1,5–2 раза жизненный цикл конструктивных элементов зданий и сооружений. Природный бентонит с номинальным размером микрочастиц примерно 6–8 мкм, состоящих из пучков пластинок, является перспективной добавкой для получения непроницаемого и прочного бетонного композита, позволяющей свести к минимуму несоответствия поровой структуры цементного камня. Проведенный анализ особенностей применения бентонита различных модификаций в качестве наполнителя вяжущих композиций позволил отметить положительный эффект его влияния на свойства цементного камня. Настоящее исследование направлено на изучение влияния бентонита (наноглины) на структуру и свойства щелочных вяжущих «аспирационная пыль – бентонит – $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ », активированных как щелочным затворителем, так и модифицированным бентонитом. Проведенные исследования позволили оценить влияние добавок активированного и органомодифицированного бентонита в составе вяжущей связки на процессы формирования структуры и свойств бетонного камня. Органомодификация бентонита катионоактивной добавкой алкилдиметилбензиламмоний хлорид способствовала созданию плотной упаковки композита, к тому же с эффектом гидрофобизации, что положительно отразилось на свойствах бетона. Полученные закономерности формирования структуры и зависимости свойств цементного камня от степени насыщения вяжущей композиции позволят получать качественную продукцию, определяя роль и возможности щелочной активации порошков алюмосиликатной природы в строительном сегменте.

Ключевые слова: бентонит, органомодификация, щелочные вяжущие, жидкое стекло, нанодобавка.

Для цитирования: Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш. Влияние активированного бентонита на свойства щелочных вяжущих материалов // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-18-24>

S.-A.Y. MURTAZAEV^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering) (s.murtazaev@mail.ru),

M.Sh. SALAMANOVA^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering) (madina_salamanova@mail.ru), Z.Sh. GATSAEV^{1,2}, Engineer (gacaev_195@mail.ru)

¹ Grozny State oil technical university named after M.D. Millionshikov (100, Avenue Isaev, Grozny, 364021, Russian Federation)

² Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (21a, Staropromyslovskoe highway, Grozny, 364021, Russian Federation)

Influence of Activated Bentonite on the Properties of Alkaline Binders

With the development of the building materials industry, significant efforts have been made to obtain high-strength and durable composites using mineral powders, nano-additives, superplasticizers based on polycarboxylate esters, etc., which significantly improve the properties and structure of concrete, thereby increasing the life cycle of structural elements of buildings and structures. Natural bentonite, otherwise called nanoclay, with a nominal size of microparticles of approximately 6–8 microns, consisting of bundles of plates, is a promising additive for obtaining an impermeable and durable concrete composite, which allows minimizing inconsistencies in the pore structure of cement stone. The analysis of the features of the use of bentonite of various modifications as a filler in binder compositions made it possible to note the positive effect of the influence of this material on the properties of cement stone. The present study is aimed at studying the effect of nanoclay on the structure and properties of alkaline binders "aspiration dust–bentonite– $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ " activated with both an alkaline aggregator and modified bentonite. The conducted studies made it possible to fully evaluate the effect of activated and organically modified bentonite additives in the composition of the binder on the processes of formation of the structure and properties of concrete stone. The organomodification of bentonite with the cationic additive alkyldimethylbenzylammonium chloride contributed to the creation of a dense packing of the composite, moreover, with the effect of hydrophobization, which had a positive effect on the properties of concrete. The obtained patterns of structure formation and the dependence of the properties of cement stone on the degree of saturation of the binder composition will make it possible to obtain high-quality products, determining the role and possibilities of alkaline activation of aluminosilicate powders in the construction segment.

Keywords: bentonite, organic modification, activation, liquid glass, nanoadditive, structure, concentration.

For citation: Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh. Influence of activated bentonite on the properties of alkaline binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 18–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-18-24>

С развитием промышленности строительных материалов предпринимаются значительные усилия для получения высокопрочных и долговечных композитов с использованием нанодобавок, поскольку известно, что нанопорошки и глины, пластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и др. суще-

ственно улучшают свойства и структуру бетона, повышая тем самым в 1,5–2 раза жизненный цикл конструктивных элементов зданий и сооружений [1–3].

Бентонит (природная наноглина) является перспективной добавкой, позволяющей свести к минимуму несоответствия поровой структуры цемент-

ного камня. Преобладающим минералом этого наноматериала выступает слоистый алюмосиликатный монтмориллонит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$, толщина слоев которого изменяется в диапазоне 1–2 нм и выполняет определенную роль в процессе формирования структуры и свойств: за счет микрочастиц, естественно коагулирующих поровое пространство камня, уменьшает водо- и газопроницаемость бетонного композита [4, 5]. Бентонит различных месторождений имеет сходный химический состав с присущими небольшими отклонениями в концентрациях основных оксидов SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . По типу и соотношению межслоевых ионов монтмориллонита бентониты можно разделить на кальциевый (Са-бентонит), натриевый (Na-бентонит) и магниевый (Mg-бентонит) [6].

В работе [7] изучалось влияние вида и концентрации вяжущей системы «портландцемент–бентонит» на свойства бетонного камня, исследовались добавки Са-, Na-, Mg-бентонитов; количество добавляемого материала варьировалось в диапазоне от 2 до 10% от массы цемента. Результаты исследований показали положительной эффект использования добавки бентонита: предел прочности при изгибе образцов в возрасте 28 сут увеличивался с повышением концентрации нанодобавки в цементной композиции. Установлена оптимальная дозировка добавки в количестве 10%; системы с введением Са-, Na-, Mg-бентонитов и кварцевого порошка SiO_2 показали следующие значения прочности при изгибе: 47,9; 54,5; 52,2 и 13,6% соответственно; прочности при сжатии 62,2; 77,5; 71,6 и 9,3% соответственно в сопоставлении с контрольными образцами.

В работе [8] исследовалось поведение Са-бентонита в цементно-песчаном растворе в зависимости от его содержания, а также его влияние на поровую структуру, проницаемость и физико-механические показатели. Бентонит вводили в цементный раствор в количестве 4 и 8% от массы цемента. Кроме того, подобные исследования проводились на образцах с добавлением кварцевого порошка SiO_2 в аналогичной дозировке. В целом введение бентонита в матрицу цементного раствора подтвердило потенциально выгодный технологический прием. Добавка нанобентонита уплотняла цементное тесто, что заведомо гарантировало минимальную пористость камня; способствовала образованию большего количества соединений типа гидросиликатов кальция (С–S–Н). Результаты испытания образцов с 8% кварца и Са-бентонита в возрасте 28 сут показали рост предела прочности при сжатии на 5,3 и 61,5% соответственно в сравнении с контрольными образцами.

В работах [9–12] приводятся результаты исследований вяжущих систем с использованием микронаполнителя из органомодифицированного бентонита (ОМБ). Предлагаемая учеными добавка проявляла упрочняющий эффект, армируя изнутри искусственный конгломерат. Микрочастицы ОМБ создавали диффузионные барьеры вокруг капиллярных пор

цементно-песчаных растворов, армируя тем самым поровую структуру и повышая прочностные характеристики. По мере увеличения дозировки ОМБ наблюдался прирост прочности цементного камня, но достигнув максимума, он заметно уменьшался.

Проведенный анализ особенностей применения бентонита различных модификаций в качестве наполнителя вяжущих композиций позволил отметить положительное влияние этого материала на свойства бетонных композитов. Настоящее исследование направлено на изучение влияния наноглины на структуру и свойства щелочных связок «аспирационная пыль–бентонит– $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ », активированных как щелочным затворителем, так и модифицированным бентонитом.

Для проведения экспериментальных исследований использовался местный бентонит (п. Катаяма, Грозный), который отбирался с разных мест в определенном количестве, и методом квартования выделялась средняя проба [4, 7]. Подготовленная проба высушивалась в сушильном шкафу при температуре 105°C и хранилась после охлаждения в закрытом виде. Аспириционная пыль (АО «Чеченцемент», РФ) собрана из отсеков пылесадительной системы холодного конца вращающейся клинкеробжигательной печи. Она представляет собой полноценную откорректированную сырьевую смесь, где под воздействием горячих дымовых газов при температуре $500\text{--}600^\circ\text{C}$ произошла термоактивация глинистых минералов с раскрытием дефектов кристаллической решетки неразложившегося кальцита. Удельная поверхность аспириционной пыли изменялась в интервале $210\text{--}230 \text{ м}^2/\text{кг}$, срок хранения проб составлял в среднем 1 мес. В качестве щелочного активатора использовали водный раствор натриевого жидкого стекла, $\text{pH}=12,8$, силикатный модуль $n=2,8$ и плотность $\rho=1,42 \text{ г}/\text{см}^3$, производитель ООО «Тантал-4», РФ.

Для исследования размеров и морфологических особенностей используемого бентонита и аспириционной пыли был использован растровый электронный микроскоп Quanta 3D 200i при различных режимах. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000. Размол бентонита производили в шаровой мельнице PM 100. Размеры частиц бентонита в суспензии исследовали анализатором субмикронных частиц HORIBA LD-550. Прочностные характеристики вяжущих систем «аспириционная пыль–бентонит– $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ » определялись согласно ГОСТ 30744–2001 на стандартных образцах-балочках размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$ из теста нормальной густоты. Измерения прочности осуществляли на гидравлическом прессе Testometric FS150AT. Водопоглощение определяли путем сравнения показателей до и после погружения образцов в воду, а именно до того времени, пока их масса не увеличится за сутки менее чем на 0,1% от первоначальной. Для этого образцы помещали в емкость с водой (уровень жидкости на 5 см выше уровня бетона), температура которой составляла $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Алгоритм приготовления вяжущей связки прост, сложность заключается в активации бентонита. На начальной стадии заранее подготовленную пробу бентонита активировали ионами натрия Na^+ , для этого предварительно приготавливали глиняный шлам, смешивая бентонит с водой в постоянном соотношении 1/1,35 при интенсивном перемешивании в течение 60 мин до получения однородной массы – суспензии. Следует отметить, что именно в этот период в результате полной дисперсации бентонита происходит увеличение удельной поверхности частиц глины. Далее полученную глиняную суспензию активировали, для чего в лабораторную мешалку с бентонитовым шламом вводили 2% карбоната натрия Na_2CO_3 (от массы глины), продолжая перемешивание дополнительно в течение 30 мин. Подготовленный таким образом глиняный шлам разливали по лоткам и высушивали в естественных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, в итоге образовывались пластины активированного бентонита. После чего полученные пластины подвергали сушке при температуре $105\text{--}110^\circ\text{C}$ до постоянной массы, затем тонко измельчали и просеивали через сито с размерами ячеек 100 мкм [7, 13, 14]. Суть активации состоит в замене обменных ионов железа, алюминия, магния на микрочастицах бентонита на ионы натрия, которым свойственна более высокая гидратационная способность. Это приводит к росту набухаемости частиц за счет определенного количества воды, поглощаемого межслойным пространством, что приводит соответственно к увеличению расстояния между нанослоями бентонита. Таким образом была подготовлена первая серия проб бентонита для наполнения вяжущей связки «аспирационная пыль – активированный бентонит – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ».

Как и любые глинистые породы, бентонит обладает высокой гидрофильностью, что приводит к повышению водопотребности формовочной смеси и отрицательно сказывается на свойствах бетонного композита, поэтому желательно его гидрофобизировать, модифицируя различными органическими соединениями. В работах [15–17] исследователями получен органобентонит, который представляет собой продукт взаимодействия естественных монтмориллонитовых глин с четвертичными аммониевыми солями, где происходит замещение неорганических катионов на органические катионы; этот процесс проходит более полно и интенсивно у щелочных бентонитов с высокой ионообменной емкостью.

В проводимых исследованиях для органоимодификации бентонита была выбрана гидрофобизирующая катионоактивная добавка, и в частности алкилди-

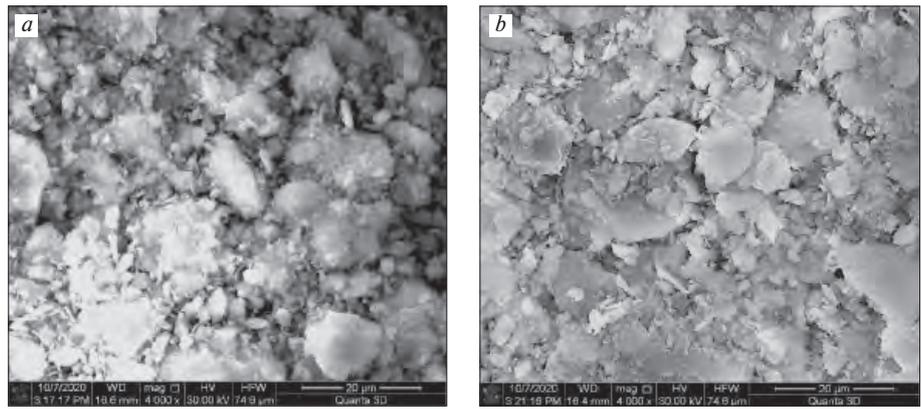


Рис. 1. Микрофотографии образцов бентонита активированного (а) и органоимодифицированного (б)

Fig. 1. Micrographs of samples of activated (a) and organo-modified (b) bentonite

тилбензиламмонийхлорид $\text{R}(\text{CH}_2)_2[\text{NCH}_2\text{C}_6\text{H}_5]^+\text{Cl}$, где R – остаток, содержащий $\text{C}_{12}\text{--}\text{C}_{18}$ (КАТАПАВ 1214.80, Волгодонск). На первом этапе была подготовлена глиняная суспензия (бентонит/вода = 1/10) с помощью интенсивного вымешивания в магнитной мешалке на протяжении 60 мин в естественных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. После этого в суспензию вводили алкилдиметилбензиламмоний хлорид (АДМАХ) и перемешивали дополнительно в течение 60 мин. Соотношение АДМАХ/бентонит составляло, мас. %: $(15\text{--}5)/(85\text{--}95)$. Полученная таким образом суспензия выдерживалась в течение суток, в ходе чего процесс органоимодификации и формирования органоглины завершался окончательно. Далее суспензию промывали дистиллированной водой и высушивали в пластиковой посуде при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, получая пластины бентонита толщиной 1–3 мм. После этого пластины бентонита сушили в сушильном шкафу при температуре $05\text{--}110^\circ\text{C}$ до постоянной массы. Далее бентонит измельчали и просеивали через сито с размерами ячеек 100 мкм [7]. Таким образом была подготовлена вторая серия проб бентонита для наполнения вяжущей связки «аспирационная пыль – органоимодифицированный бентонит – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ».

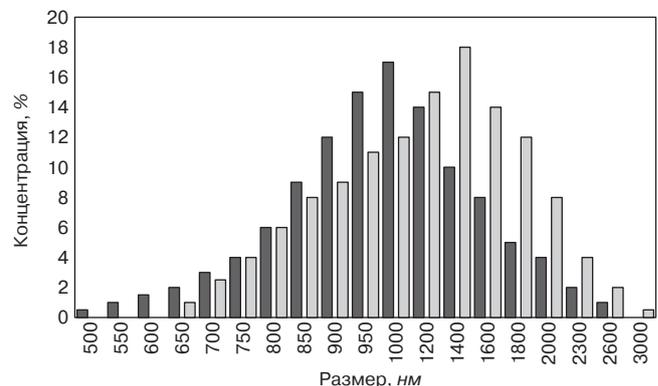


Рис. 2. Распределение частиц бентонита активированного (■) и органоимодифицированного (□) по размерам

Fig. 2. Size distribution of bentonite particles in activated (■) and organically modified (□)



Рис. 3. Микрочастица аспирационной пыли (а); размер зерен (b); частица после ионного травления (с)
 Fig. 3. Microparticle of aspiration dust (a); grain size (b); particle after ion etching (c)

Изучение структурных изменений образцов бентонита размерами до 10 мкм, вызванных активацией и органомодификацией, проводили на растровом электронном микроскопе Quanta 3D 200i в различных режимах; на рис. 1 представлены микрофотографии материала при увеличении $\times 4000$. По микроанализу можно предположить, что структура органомодифицированного бентонита более плотная со свойственной ей закрытой пористостью.

Высокая адсорбционная способность поверхностей пластин бентонита и гидратация на обменных ионах приводят к набуханию наноглины в воде с увеличением объема до 20 раз. На рис. 2 приведены результаты исследований образцов 1%-х суспензий бентонита, активированного ионами натрия и органомодифицированного АДМАХ. Образцы бентонита исследовались в натриевом жидком стекле, которые перемешивали в магнитной мешалке в течение 5 мин.

Результаты распределения частиц по размерам для двух видов бентонита были сходными с пиками при 1000 и 1400 нм. Распределение частиц органомодифицированного бентонита чуть смещено в сторону меньших размеров. Можно предположить, что гидрофобные частицы органомодифицированного бентонита могут уплотнять бетон, препятствовать диффузии порового раствора и агрессивных химических веществ и тем самым снижать проницаемость.

Аспирационная пыль является по своей значимости немаловажным компонентом вяжущей связки «аспираторная пыль–бентонит– $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ ». Проведенный микроскопический анализ показал, что частицы цементной пыли в основном состоят из окисленных, безводных зерен, а также агрегатов различной формы и плотности (рис. 3, а), собранных из электрофильтров во время высокотемпературного обжига клинкера. Размер крупных частиц может достигать 50–150 мкм и более (рис. 3, b). Для исследования подповерхностных слоев частицы с помощью технологии ионного травления были сделаны поперечные сечения размером 40×15 мкм на поверхности образца (рис. 3, c); установлена закрытая пористость внутренней поверхности материала, указывающая на начальную стадию минералообразования и под-

тверждающая высокую реакционную способность аспирационной пыли.

Химический состав аспирационной пыли является стабильным и строго регламентированным, так как это отход цементного производства и он не может сильно отличаться от клинкерного, но из-за соприкосновения с топочными газами и стенками пылеосадительной системы обнаружено присутствие щелочных оксидов выше установленной нормы, что и послужило отказом от этого продукта в целях возврата в технологический цикл. Химический состав аспирационной пыли, %: $\text{MgO}=0,97$; $\text{Al}_2\text{O}_3=4,68$; $\text{SiO}_2=20,31$; $\text{K}_2\text{O}=6,43$; $\text{CaO}=64,15$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=3,47$ [18– 20].

Результаты рентгенофазового анализа подтвердили присутствие свободной извести, кальцита, кристаллов β -формы силикатов кальция, кварца, каолинита, мусковита, в небольшом количестве сульфатов и щелочей (рис. 4).

Микроанализ компонентов проектируемого вяжущего «аспираторная пыль–бентонит– $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ » подтвердил возможность получения качественной строительной продукции на его основе, поэтому были предприняты попытки получения щелочной цементной композиции с использованием активированного и органомодифицированного бентонита. Для этого были изготовлены стандартные образцы–балочки размером $40\times 40\times 160$ мм (не менее трех образцов для каждой серии) из щелочного теста нормальной густоты с введением в вяжущую систему бентонита двух

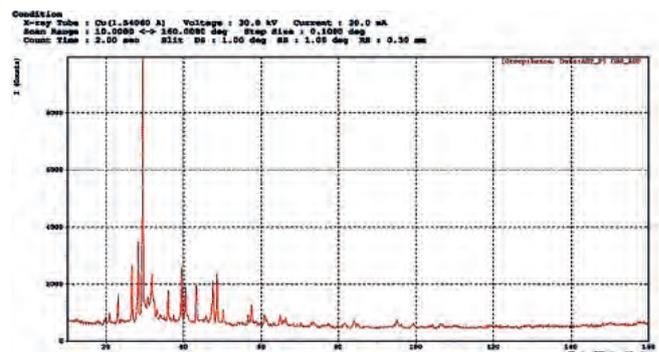


Рис. 4. Рентгенограмма микрочастиц аспирационной пыли
 Fig. 4. X-ray pattern of aspiration dust microparticles

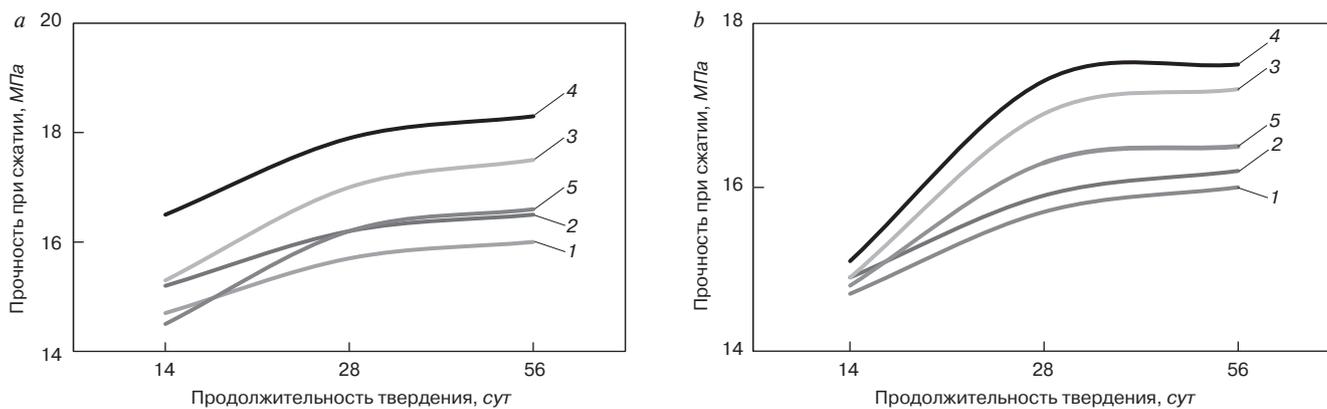


Рис. 5. График зависимости прочности образцов от степени наполнения добавкой бентонита органомодифицированного (а) и активированного (b), %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 6; 4 – 9; 5 – 12

Fig. 5. Graph of the dependence of the intensity of selection on the degree of increase by the addition of bentonite organo-modified (a) and activated (b), %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 6; 4 – 9; 5 – 12

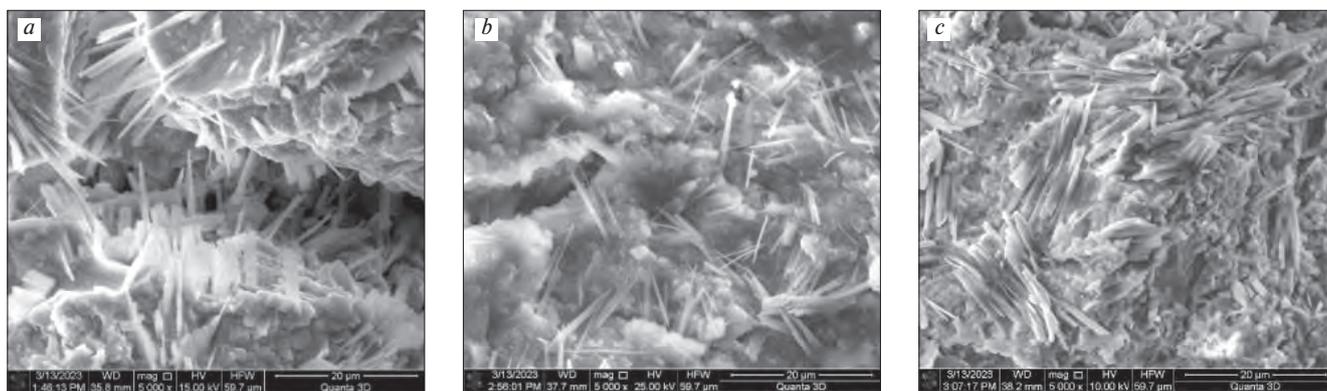


Рис. 6. Микрофотографии излома образцов: а – контрольного; б – добавка 9% бентонита активированного; с – добавка 9% бентонита органомодифицированного

Fig. 6. Micrographs of the fracture of samples: a – control; b – with the addition of 9% activated bentonite; c – with the addition of 9% organically modified bentonite

видов модификации в дозировке 3, 6, 9 и 12% от массы аспирационной пыли. В качестве щелочного затворителя использовался водный раствор жидкого натриевого стекла с силикатным модулем 2,8 и плотностью 1,42 г/см³. Для приготовления цементно-песчаного раствора использовался вольский монофракционный песок (ГОСТ 6139–2003) с модулем крупности $M_k=2,5$. Испытания проводили согласно ГОСТ 30744–2001 на установке Testometric FS150AT, прочностные характеристики определялись в возрасте 7, 28 и 56 сут.

Результаты испытаний показали, что предел прочности при сжатии образцов на связке «аспираторная пыль–бентонит– $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ » растет в пропорциональной зависимости с увеличением концентрации бентонита в системе, но до дозировки 9%; потом прочность цементного камня начинает снижаться. Эта тенденция распространяется на все серии образцов независимо от вида активации бентонита. Органомодификация бентонита положительно отразилась на наборе прочности образцов, максимальный результат прочности при сжатии 18,4 МПа получен при дозировке добавки 9% от массы аспираторной пыли (рис. 5, а), что примерно на 4–5% выше прочности цементного камня с наполнителем из активированного бентонита (рис. 5, б). Дальнейшее

увеличение дозировки бентонита в обоих случаях привело к снижению прочности, что можно обосновать природой алюмосиликатной минеральной добавки, представленной кислотными оксидами, оказывающими влияние на щелочность среды. В общем можно отметить, что модификация бентонита привела к увеличению прочности при сжатии на 12–13% в сравнении с контрольными образцами. Образцы цементного камня на вяжущей связке «аспираторная пыль–9% бентонит– $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ » в возрасте 56 сут были исследованы методом электронной микроскопии с помощью Quanta 3D 200i.

Исследование микроструктуры излома образцов с добавками активированного и органомодифицированного бентонитов показало, что матрицы отличаются массивной неоднородной и более пористой структурой, присутствуют скрытокристаллические раскристаллизованные игольчатые агрегаты, сложенные гидратными соединениями силикатов кальция (рис. 6, а). Полости, микротрещины и межкристаллические пространства пронизаны кристаллами игольчатой формы (длиной до 200–300 мкм) гидроалюмосиликатов кальция и пластинчатыми агрегатами гидроалюминатов кальция (рис. 6, б, с). Сравнивая микрофотографии образцов различных композиций, трудно не заметить, что добавка 9% органомодифи-

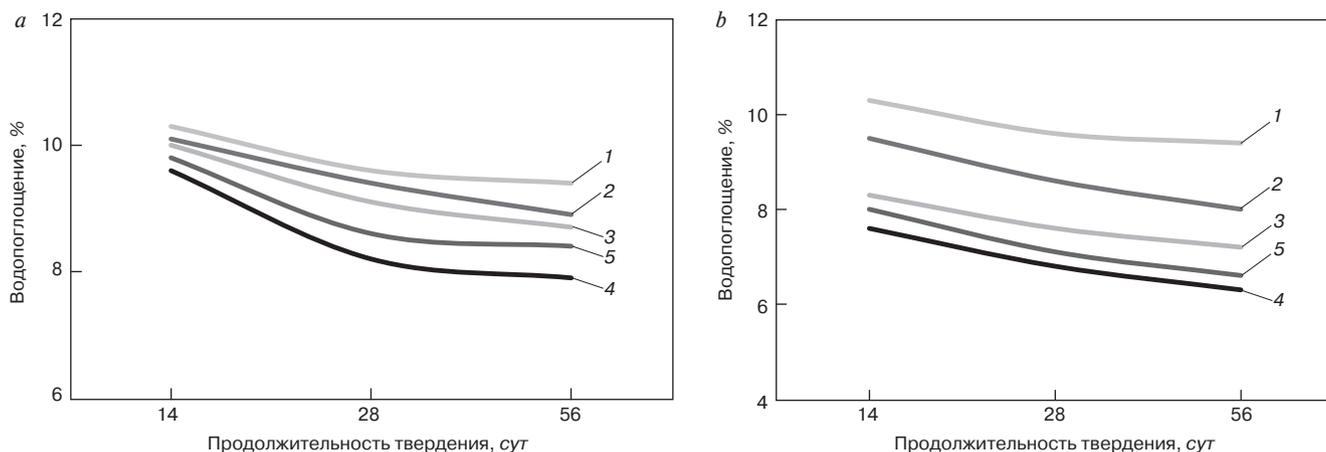


Рис. 7. Зависимость водопоглощения образцов от степени наполнения добавкой бентонита активированного (a) и органомодифицированного (b), %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 6; 4 – 9; 5 – 12

Fig. 7. Graph of the dependence of water absorption of samples on the degree of filling with the addition of bentonite (a) activated (b) organomodified, %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 6; 4 – 9; 5 – 12

цированного бентонита привела к образованию более плотной структуры и большому количеству игольчатых кристаллообразований.

Исследование поровой структуры проводили по методике определения водопоглощения по массе образцов цементного камня с использованием добавки активированного и органомодифицированного бентонита. На рис. 7 представлены результаты испытаний. Анализируя полученные данные, можно констатировать, что органомодификация и активация бентонита благоприятно отразилась на состоянии порового пространства, в сравнении с контрольными образцами водопоглощение снизилось на 16–30%; этому способствовало оптимальное содержание бентонита в системе; проникая в поры и капилляры, микрочастицы оказывали коагулирующее действие, увеличиваясь в объеме и повышая тем самым непроницаемость цементного камня.

Проведенные исследования позволили в полной мере оценить влияние добавок активированного и органомодифицированного бентонита в составе связки «аспирационная пыль–бентонит– $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ » на процессы формирования структуры и свойств бетонного камня. Органомодификация бентонита (9% от массы аспирационной пыли) катионактивной добавкой АДМАХ способствовала созданию плотной упаковки композита, к тому же с эффектом гидрофобизации, что положительно отразилось на свойствах бетона. Полученные закономерности формирования структуры и зависимости свойств цементного камня от степени насыщения вяжущей композиции позволяют получать качественную продукцию, определяя роль и возможности щелочной активации порошков алюмосиликатной природы в строительном сегменте.

Список литературы / References

1. Basheer L., Kropp J., Cleland D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review. *Construction and Building Materials*. 2001.

Vol. 15. No. 2–3, pp. 93–103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)

- Segad M., Jönsson B., Åkesson T., Cabane B. Ca/Na montmorillonite: Structure, forces and swelling properties. *Langmuir*. 2010. Vol. 26. No. 8, pp. 5782–5790. DOI: 10.1021/la9036293
- Yang H., Long D., Zhenyu L. Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 224, pp. 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.073>
- Висханов С.С., Сапаев Х.Х., Слонов А.Л. Органомодификация и исследование свойств природного бентонита месторождения Чеченской Республики // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. 2022. Т. 12. № 3. С. 47–51.
- Viskhanov S.S., Sapaev Kh. Kh., Slonov A. L. Organomodification and study of the properties of natural bentonite from the deposit of the Chechen Republic. *Izvestiya of the Kabardino-Balkarian State University*. 2019. No. 7, pp. 32–40. (In Russian).
- Патент № 2595125 С1. Российская Федерация, МПК С04В 33/04. Способ получения активированного порошкообразного бентонита: № 2015133276/03. Заявл. 07.08.2015. Опубл. 20.08.2016 / В.Х. Межидов, С.С. Висханов, А.Л. Даудова, А.С. Эльдерханов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова».
- Patent No. 2595125 C1 Russian Federation, IPC C04B 33/04. Method for producing activated powdered bentonite: No. 2015133276/03: Appl. 08/07/2015. Publ. 08.20.2016 / V.Kh. Mezhidov, S.S. Viskhanov, A.L. Daudova, A.S. Elderkhanov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Grozny

- State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov».
6. Муртазаев С.-А.Ю., Сайдумов М.С., Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш. Перспективы использования бентонитовых глин в составах бетонных композитов // *Вестник Грозненского государственного нефтяного технического университета. Технические науки*. 2020. Т. 4. № 22. С. 70–76.
 6. Murtazaev S.-A.Yu., Saidumov M.S., Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh. Prospects for the use of bentonite clays in the composition of concrete composites. *Vestnik of the Grozny State Oil Technical University. Technical science*. 2020. Vol. 4. No. 22, pp. 70–76. (In Russian).
 7. Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш., Сызранцев В.В. Исследование свойств щелочных вяжущих материалов с добавкой тонкодисперсного бентонита // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2022. Т. 17. № 8. С. 1017–1026.
 7. Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh., Syzrantsev V.V. Investigation of the properties of alkaline binders with the addition of finely dispersed bentonite. *Vestnik of the Moscow State University of Civil Engineering*. 2022. Vol. 17. No. 8, pp. 1017–1026. (In Russian).
 8. Chesnene Yu., Baltushnikas A., Lukosyute I. Influence of organoclay structural characteristics on properties and hydration of cement pastes. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 166, pp. 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.099>
 9. Liu M., Hu Y., Lai Z. Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 241. 118015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118015>
 10. Jlassi K., Krupa I., Chehimi M.M. Chapter 1 – Overview: clay preparation, properties, modification. *Clay-Polymer Nanocomposites*. Elsevier. 2017, pp. 1–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46153-5.00001-X>
 11. Kuo W.Y., Huang J.S., Lin C.H. Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars. *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. No. 5, pp. 886–895. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.013>
 12. Li H.A., Gang Xiao H., Hing Ou J. Study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34. No. 3, pp. 435–438. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.025>
 13. Liu L. Prediction of swelling pressures of different types of bentonite in dilute solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2013. Vol. 434, pp. 303–318. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.05.068>
 14. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R.D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. No. 12, pp. 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
 15. Norhasri M.S.M., Hamidah M.S., Fadzil A.M. Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 133, pp. 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005>
 16. Jiang J., Lu Z., Li J. Preparation and properties of nanopore-rich lightweight cement paste based on swelled bentonite. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 199, pp. 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.278>
 17. Трофимова Ф.А., Демидова М.И., Лыгина Т.З. и др. Технология активации бентонитовых глин, их модификация и результаты применения органобентонитов в качестве перспективных термостабилизаторов эластомеров. *Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. Петрозаводск: Геологический институт КНЦ РАН*, 2009. С. 121–126.
 17. Trofimova F.A., Demidova M.I., Lygina T.Z. et al. Technology of activation of bentonite clays, their modification and the results of the use of organobentonites as promising thermal stabilizers for elastomers. *New methods of technological mineralogy in the evaluation of metal and industrial ores minerals. Petrozavodsk: Geological Institute of KSC RAS*. 2009, pp. 121–126. (In Russian).
 18. Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю. Цементы щелочной активации: возможность снижения энергоемкости получения строительных композитов // *Строительные материалы*. 2019. № 7. С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-32-40>
 18. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu. Cements of alkaline activation the possibility of reducing the energy intensity of building composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 7, pp. 32–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-32-40>
 19. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // *Приволжский научный журнал*. 2018. Т. 46. № 2. С. 65–70.
 19. Murtazayev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Prospects of the use of thermoactivated raw material of aluminosilicate nature. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2018. Vol. 46. No. 2, pp. 65–70. (In Russian).
 20. Саламанова М.Ш., Алиев С.А., Муртазаева Р.С.-А. Структура и свойства вяжущих щелочной активации с использованием цементной пыли // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2019. Т. 46. № 2. С. 148–158.
 20. Salamanova M.Sh., Aliyev S.A., Murtazayev R.S.-A. The structure and properties of binders alkaline activation using cement dust. *Vestnik of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2019. Vol. 46. No. 2, pp. 148–158. (In Russian).

Научно-практическая конференция «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении»

18–21 июля 2023 г. в конгресс-центре СОК «Бухта Лазурная» ООО «Карачинский источник» (озеро Чаны Новосибирской обл.) состоялась научно-практическая конференция «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении». Ее организаторами выступили Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН), Российская академия естественных наук (РАЕН), Академия проблем качества (АПК). Традиционно информационную поддержку мероприятия наших партнеров взяла на себя объединенная редакция научно-технических журналов «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство».

Очное участие в конференции приняли представители вузов и научно-производственных организаций из Новосибирской, Томской, Самарской, Ярославской, Московской, Пензенской областей, республик Татарстан и Мордовия.

Ректор НГАСУ (СИБСТРИН) **Ю.Л. Сколупович**, д-р техн. наук, член-корр. РААСН, не только поприветствовал участников конференции, но и сделал два чрезвычайно интересных доклада. В первом докладе о роли науки при подготовке кадров для строительной отрасли и возможностях расширения взаимодействия со строительным комплексом региона Юрий Леонидович предложил формирование новых структурных изменений при подготовке инженерных кадров в совокупности с отраслевыми научными и проектными организациями, что позволит перейти на новый уровень компетенций как в строительстве, так и в строительном материаловедении.

Второй доклад был посвящен водным ресурсам России, их включению в хозяйственный оборот для нужд промышленности и ЖКХ, а также очистке и вторичному использованию сточных вод.

А.С. Денисов, д-р техн. наук, приветствовал участников конференции от имени руководства Новосибирского государственного аграрного университета. Его сообщение касалось проблем и текущих задач в аграрном строительстве. Он напомнил, что существенная доля промышленности строительных материалов и строительных организаций традиционно была в подчинении Минсельстроя. Однако после реорганизации управления экономикой и промышленностью многие предприятия, не выдержав перемен, ушли с рынка. Эту нишу пытаются занять новые крупные и средние предприятия и строительные организации. Однако им приходится сталкиваться с рядом эксплуатационных, технических и технологических особенностей сельского строительства. Александр Сергеевич отметил, что в аграрных вузах уделяется мало внимания специфическим особенностям подготовки кадров для сельского строительства, традиционная материаловедческая наука их тоже практически не учитывает, при внедрении полезных разработок в практику строительных организаций возникают дополнительные сложности.

В.Ф. Хританков, генеральный директор ООО «Карачинский источник», д-р техн. наук, рассказал об истории появления и становления спортивно-оздоровительного комплекса «Бухта Лазурная» и бальнеологического курорта «Озеро Карачи». Однако главным в докладе было не описание природных и климатических факторов и методик лечения, а представление примененных при их воссоздании (курорт «Озеро Карачи» поднимался буквально из руин) новых технологий и материалов. Ряд научных разработок был выполнен специально для этих объектов. В настоящее время курорт «Озеро Карачи» вновь стал одной из лучших здравниц России.

В докладе д-ра техн. наук **А.П. Пичугина** (НГАУ) были представлены тенденции в совершенствовании строительных материалов и изделий, обобщающие современные мировые достижения. Особенно заинтересовала слушателей информация о таких материалах, как самовосстанавливающийся, гибкий и светопрозрачный бетон, гибкая и прозрачная древесина, гидрокерамика, прозрачный алюминий, ультрабелая краска с полным отражением тепловых потоков, гибкая керамика и др.

С большим теоретическим докладом по проблемам модификации полимерных строительных материалов выступил д-р техн. наук **В.Г. Хозин** (КГАСУ). Он представил тенденции модифицирования полимерных материалов на основе современных достижений науки с использованием методов исследований не только надмолекулярной структуры полимеров, но и с учетом взаимодействия на атомном уровне. Такой подход позволяет создавать материалы с заданными характеристиками и обеспечивать их длительную эксплуатационную надежность. Кроме того, такие материалы открывают новые направления в применении, что особенно важно в условиях импортозамещения.

Доклад д-ра техн. наук **С.М. Анпилова** «Рациональные подходы к использованию металлических профилей и активных минеральных вяжущих в монолитном домостроении» в значительной мере был построен на личном производственном опыте автора. Продемонстрированы этапы создания легких несущих конструкций на основе специальных тонкостенных металлических профилей, которые при минимальном расходе бетона и арматуры воспринимают нормативные нагрузки, превосходящие по эффективности традиционные варианты пролетных элементов.

А.Ф. Бурьянов, д-р техн. наук (МГСУ), в докладе «Материалы на основе искусственных минеральных вяжущих и пути обеспечения их качества» заострил внимание на крупнотоннажных отходах фосфогипса и показал пути его эффективного использования. Положительные примеры практического использования этого технологического сырья в строительной индустрии доказывают потенциал существенной экономии в производстве ряда строительных материалов.

Интересный доклад о получении и применении высокопрочного конструкционного и декоративного бетона сделала создатель и руководитель фирмы «3D-бетон» **Я.А. Санягина**. Доклад сопровождался большим количеством иллюстративного материала с анализом методов получения высокопрочных бетонов и их практического применения в различных сферах использования.

Также на конференции было представлено более сорока стендовых докладов, с которыми коллеги знакомились в перерывах пленарного заседания.

Выездная сессия конференции состоялась на заводе по добыче и розливу минеральной воды «Карачинский источник». В.Ф. Хританков лично провел экскурсию и особо отметил научные и технические разработки, примененные при строительстве новых цехов предприятия. Также участники конференции посетили курорт «Озеро Карачи», где они смогли оценить результат реставрационно-восстановительных работ и нового строительства.



УДК 666.913

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-26-34>

Я.И. КОСОВ¹, канд. техн. наук (KosovYal@nornik.ru), Д.В. РУМЯНЦЕВ¹, заведующий лабораторией пиromеталлургии, М.С. ПОПОВ¹, инженер; А.В. ТРОФИМОВ¹, канд. техн. наук (TrofimovAV@nornik.ru); А.И. ДЕВОЧКИН², заместитель директора по научно-техническому развитию, В.М. ТОЗИК², бывший главный инженер; А.В. КЕЛЕХСАЕВ³, канд. техн. наук

¹ ООО «Институт Гипроникель» (195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, 11)

² ЗФ ПАО «ГМК Норильский Никель» (123100, г. Москва, 1-й Красногвардейский пр-д, 15)

³ Центр технической экспертизы ПАО «ГМК Норильский Никель» (123100, г. Москва, 1-й Красногвардейский пр-д, 15)

Исследование получения ангидрита из гипса техногенного происхождения и возможность его использования при производстве закладочных смесей для условий рудников Талнаха

Представлены результаты исследований по разработке технологии получения ангидрита сульфата кальция обжигом техногенного гипса, полученного от нейтрализации серной кислоты при утилизации серосодержащих газов от пиromеталлургической переработки руд и концентратов ПАО «ГМК «Норильский Никель». Исследованы гранулометрический, фазовый, химический составы техногенного гипса и продуктов обжига техногенного вторичного сырья в интервале температуры от 600 до 1200°C. Проведен анализ влагопоглощающей способности гипса и продуктов обжига. Показаны возможности применения полученного ангидрита взамен природного сырья в технологии закладки выработанного пространства рудника. Представлены результаты испытаний закладочных смесей с применением искусственного ангидрита.

Ключевые слова: техногенный гипс, искусственный ангидрит, сульфат кальция, обжиг, закладочные смеси, состав, закладка выработанного пространства.

Для цитирования: Косов Я.И., Румянцев Д.В., Попов М.С., Трофимов А.В., Девочкин А.И., Тозик В.М., Келексаев А.В. Исследование получения ангидрита из гипса техногенного происхождения и возможность его использования при производстве закладочных смесей для условий рудников Талнаха // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-26-34>

Ya.I. KOSOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (KosovYal@nornik.ru), D.V. RUMYANTSEV¹, head of laboratory of pyrometallurgy; M.S. POPOV¹, Engineer; A.V. TROFIMOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (TrofimovAV@nornik.ru); A.I. DEVOCHKIN², Deputy Director for Scientific and Technical Development; V.M. TOZIK², former chief engineer; A.V. KELEKSAEV³, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ "Gipronickel Institute" LLC (11, Grazhdansky Avenue, St. Petersburg, 195220, Russian Federation)

² "MMC "Norilsk Nickel" Polar Branch PJSC (15, 1st Krasnogvardeisky passage, Moscow, 123100, Russian Federation)

³ "MMC "Norilsk Nickel" Technical expert examination center PJSC (15, 1st Krasnogvardeisky passage, Moscow, 123100, Russian Federation)

Investigation of the Production of Anhydrite from Technogeneous Gypsum and the Possibility of its Use in the Production of Filling Mixture (Backfill Blend) for the Conditions of the Talnakh Mines

The results of studies on the development of a technology for the production of calcium sulfate anhydrite by roasting technogenic gypsum obtained from the neutralization of sulfuric acid during the disposal of sulfur-containing gases from the pyro-metallurgical processing of ores and concentrates of PJSC MMC Norilsk Nickel are presented. The granulometric, phase, and chemical compositions of technogenic gypsum and roasting products of technogenic secondary raw materials were studied in the temperature range from 600 to 1200°C. The moisture-absorbing capacity of gypsum and roasting products was analyzed. The possibilities of using the obtained anhydrite instead of natural raw materials in the technology of backfilling the mined-out area of the mine are shown. The results of tests of filling mixtures with the use of artificial anhydrite are presented.

Keywords: technogeneous gypsum, artificial anhydrite, calcium sulphate, roasting, filling mixture, composition, backfilling the mined-out area.

For citation: Kosov Ya.I., Rumyantsev D.V., Popov M.S., Trofimov A.V., Devochkin A.I., Tozik V.M., Keleksaev A.V. Investigation of the Production of anhydrite from technogeneous gypsum and the possibility of its use in the production of filling mixture (backfill blend) for the conditions of the Talnakh mines. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 26–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-26-34>

В настоящее время в промышленности существует много химических технологий, в которых в качестве побочных продуктов образуются отходы на основе сульфата кальция [1–2]. Сульфатные отходы носят собирательное название «технологические», или «техногенные», гипсы независимо от способа их получения и минерального состава [3]. Им присваиваются названия по наличию примесей, находящихся в сульфатных продуктах, например фосфогипс,

борогипс, титаногипс, фторангидрит, кальцитангидрит и др. Безводную форму сульфата кальция, образующуюся в той или иной технологии, называют техногенным ангидритом.

Для заполнения горных выработок в ПАО «ГМК «Норильский Никель» используют закладочные смеси на основе природного ангидрита [4]. При этом для получения ангидритового вяжущего ежегодно добывается порядка 1,8 млн т природного ангидрита.

В основном при использовании техногенного ангидрита в качестве вяжущего применяется активация различными минеральными добавками для повышения скорости схватывания [5, 6]. Однако при использовании ангидрита в составе закладочной смеси он не нуждается в активации, так как используется не как воздушное вяжущее, а как гидравлическое (или в составе гидравлического вяжущего). В этом случае скорость твердения должна иметь низкие значения, так как закладочная смесь, в которой используется ангидрит, доставляется в подземное пространство рудника по трубопроводам под действием силы тяжести.

Переработка на металлургических предприятиях сульфидного сырья приводит к получению отходящих газов с высокой концентрацией диоксида серы (до 30–40% об.) [7, 8]. В настоящее время ПАО «ГМК «Норильский Никель» реализует «Серный проект» – экологическую программу, предусматривающую значительное сокращение суммарных выбросов диоксида серы в Заполярном филиале (ЗФ) к 2023 г. В рамках проекта планируется строительство в ЗФ на Надеждинском металлургическом заводе им. Б.И. Колесникова (НМЗ) установок по улавливанию богатых серой газов и производство серной кислоты с ее последующей нейтрализацией известняком с получением отвалного гипса [9]. Для снижения экологической нагрузки по хранению большого количества сульфатных отходов, характерной для предприятий химической технологии, которые перерабатывают кальцийсодержащее сырье серноокислотным способом, рассматривается возможность использования техногенного гипса (сульфатных отходов).

Использование кека нейтрализации серной кислоты – техногенного гипса при приготовлении твердеющих закладочных смесей на рудниках Талнаха позволило бы отказаться от добычи природного ангидрита. Однако в существующем виде гипс не может быть использован в технологиях закладочных смесей ввиду неудовлетворительных реологических свойств. Для значительного вовлечения гипсового кека в состав закладочных смесей необходима разработка технологии получения искусственного ан-

гидрита и использования его в приготовлении закладочных смесей.

Настоящая работа направлена на оценку возможности использования искусственного ангидрита, полученного из техногенного гипса, и определение параметров обжига предполагаемой технологической схемы.

Материалы и методы исследования

Техногенный гипс является продуктом нейтрализации серной кислоты известняком. Серная кислота получена при утилизации серосодержащих газов от пирометаллургической переработки руд и концентратов Норильского промышленного района (НПР). В рамках пилотных исследований пульпу известняка изготавливали из перемолотого известняка Каларгонского месторождения. Химический состав известняка для приготовления пульпы на нейтрализацию приведен в табл. 1.

Выход класса крупности $-0,045$ мм известняка после измельчения для приготовления пульпы равен 90,5%. Так как на нейтрализацию направляется концентрированная серная кислота 95%, то природа примесей в гипсе будет зависеть от химического состава известняка, идущего на нейтрализацию.

Опытная партия гипсовой пульпы была наработана в цехе по производству элементарной серы НМЗ.

Техногенный гипс представляет собой двухводный сульфат кальция или дигидрат сульфата кальция и примеси. Химический состав приведен в табл. 2.

Гипс содержит около 87% дигидрата сульфата кальция, остальное примеси, в состав которых входит карбонат кальция (около 3%) и магнезия (около 1%), оксиды кремния (около 3,5%), алюминия (около 1%), железа (около 2,5%), щелочных металлов (суммарно менее 0,5%).

Влажность гипсовой пульпы составляет более 60%. Материал предварительно подвергался сушке. Для установления параметров обжига техногенного гипса эксперименты проводили в стационарных условиях в камерной печи и динамических условиях в трубчатой вращающейся печи.

Таблица 1
Table 1

Химический состав известняка для нейтрализации серной кислоты
The chemical composition of limestone to neutralize sulfuric acid

Материал	Массовая доля, %									
	CaCO ₃	Ni	Cu	Co	Fe	S _{об}	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Известняк	90,1	0,175	0,24	<0,01	0,94	0,4	<0,01	1,18	1,3	4,99

Таблица 2
Table 2

Химический состав техногенного гипса
The chemical composition of technogenic gypsum

Материал	Массовая доля, %									
	CaO	S(SO ₄)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	
Техногенный гипс	32,2	16,2	0,59	3,41	0,98	0,44	0,1	0,36	0,83	

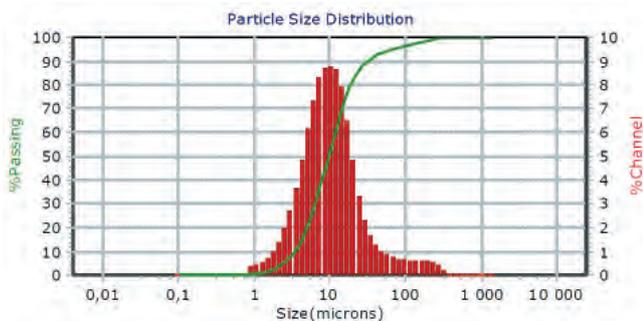


Рис. 1. Интегральная и дифференциальная кривые распределения частиц по размерам

Fig. 1. Integral and differential curves of particle size distribution

Исследования крупности частиц техногенного гипса и продуктов его обжига проводились на лазерном анализаторе размера частиц Microtrac S3500, определение основных фаз на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8, исследования методами РЭМ–РСМА выполнены на аналитическом комплексе на базе двулучевого сканирующего электронно-ионного микроскопа TESCAN LYRA3 GMH, термическое поведение на термическом анализаторе SETSYS evolution TG-DSC/DTA 1750 SETARAM, химический анализ проб методами АЭС/МС с ИСП, ИК-спектроскопии.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Исследование исходного материала

Измерения крупности частиц гипсовой пульпы показали, что средний размер частиц составляет около 10 мкм (рис. 1).

Результаты микроскопического исследования показали, что техногенный гипс по аналогии с другими техногенными отходами на основе сульфата кальция состоит из очень мелких первичных кристаллов $CaSO_4$, агломерированных во вторичные конгломераты (рис. 2). Благодаря высокой удельной поверхности он должен обладать повышенной реакционной способностью.

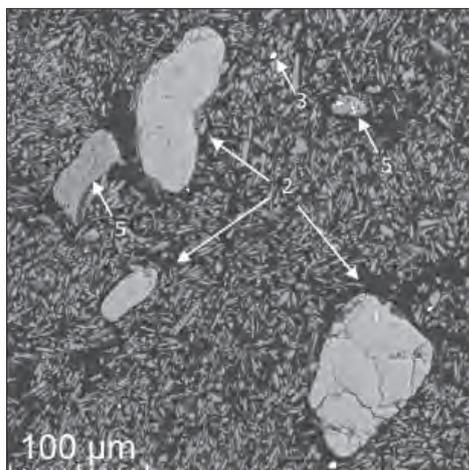
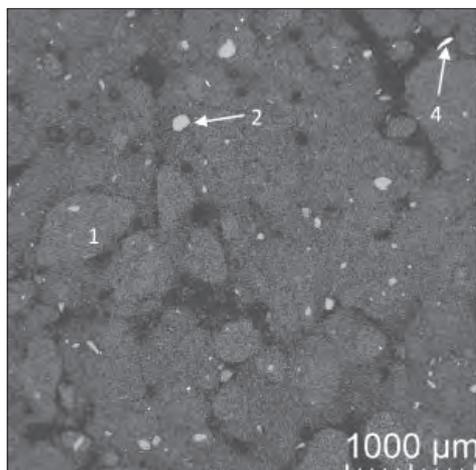


Рис. 2. Электронное изображение техногенного гипса: 1 – дигидрат сульфата кальция (основа); 2 – включения карбоната кальция; 3 – сульфидные микровключения; 4 – оксидные микровключения; 5 – алюмосиликат кальция

Fig. 2. Electronic image of technogenic gypsum: 1 – calcium sulfate dihydrate (base); 2 – inclusions of calcium carbonate; 3 – sulfide microinclusions; 4 – oxide microinclusions; 5 – calcium aluminosilicate

Помимо дигидрата сульфата кальция, в материале присутствует карбонат кальция, средняя крупность частиц которого составляет порядка 60–70 мкм (максимальная – до 350 мкм). Ориентировочная объемная доля указанных частиц около 5–10 об. %. В материале также присутствуют фазы: оксида железа-никеля по составу, приближающегося к ферриту никеля; оксида железа, по составу приближающегося к магнетиту; сульфида меди, по составу приближающегося к халькозину; сульфида железа, по составу приближающегося к пирротину и пириту; сульфида железа-никеля, по составу приближающегося к пентландиту. Ориентировочная суммарная объемная доля перечисленных оксидных и сульфидных компонентов составляет около 0,1–0,2 об. %. Помимо перечисленных компонентов, в пробе единично были обнаружены: медь металлическая, алюмосиликаты и оксид меди.

2. Определение параметров обжига

Согласно имеющимся литературным данным [10, 11] в системе $CaSO_4-H_2O$ установлено наличие следующих соединений: дигидрат сульфата кальция $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; полугидрат сульфата кальция $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$; растворимый ангидрит, или ангидрит III – $CaSO_4$; нерастворимый ангидрит, он же ангидрит II – $CaSO_4$. Этот ангидрит аналогичен природному; ангидрит I, образующийся при температуре свыше 1180°C. Также есть сведения [12] о существовании промежуточных соединений (обезвоженный полугидрат) и модификаций (α и β). Краткая схема превращений от дигидрата сульфата кальция до ангидрита, характерная для природного гипсового камня, представлена на рис. 3.

Из всех вышеназванных соединений стабильными являются $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и ангидрит II. Полугидрат может переходить в дигидрат, растворимый ангидрит может переходить в полугидрат. Методами рентгенофазового анализа установлено наличие трех типов



Рис. 3. Краткая схема превращения гипса в ангидрит

Fig. 3. Scheme of transformations of gypsum into anhydrite

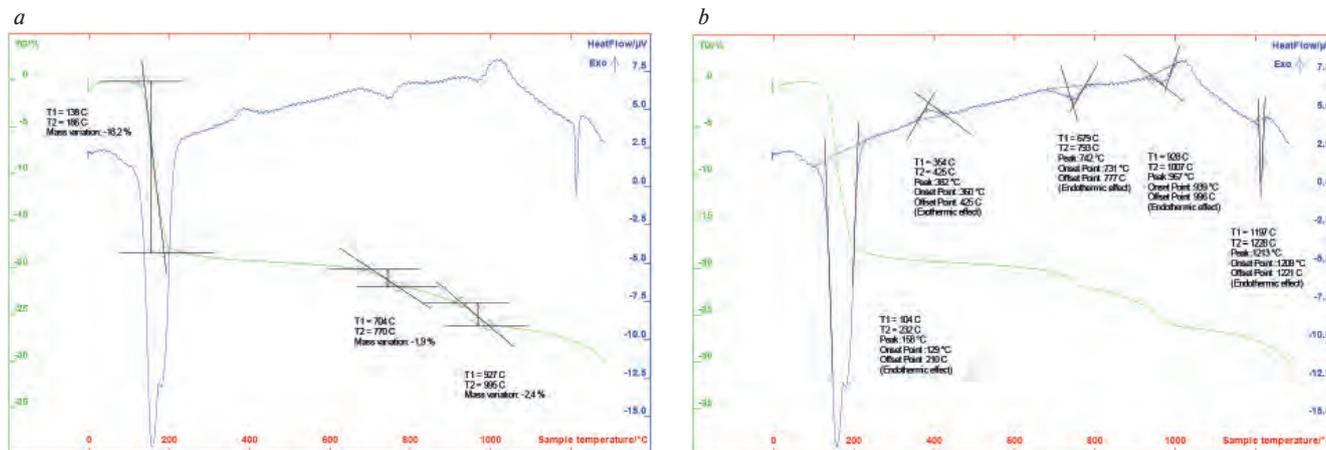


Рис. 4. Результаты исследования на термоанализаторе: а – ТГ-кривая; б – ДТА-кривая
Fig. 4. The results of the study on the thermal analyzer: a – TG-curve; b – DTA-curve

кристаллических решеток: дигидрата, полугидрата и ангидрита. Решетка обезвоженного полугидрата аналогична решетке полугидрата, а ангидрита III — ангидритам I и II.

Выделение воды из дигидрата начинается при 107°C. При этом образуется полугидрат. Выход воды приводит к разрушению зерен, поэтому данная форма гипса характеризуется высокой дисперсностью и водопотребностью. При температуре от 180 до 200°C полугидрат обезвоживается, при этом не происходит перестройки кристаллической решетки. Обезвоженные полугидраты характеризуются высокой гигроскопичностью и быстро переходят в полугидраты. При нагревании обезвоженных полугидратов до температуры 300–360°C они переходят в растворимые ангидриты с перестройкой кристаллической решетки. При дальнейшем нагревании образуется нерастворимый ангидрит. По данным [13], для получения нерастворимого ангидрита требуется температура выше 750°C. При температуре более 800°C сульфат кальция начинает разлагаться на CaO и SO₂ [12]. По другим данным [14], только в интервале температуры от 900 до 1000°C начинается частичная диссоциация сернистого кальция и в составе продукта обжига появляется свободный оксид кальция (2–3%).

Приведенные данные о продуктах дегидратации гипса, образующихся при различной температуре обжига, относятся к исследованиям, полученным для гипса природного происхождения. Однако, как для каждого природного гипсового материала, так и для техногенного интервал температуры дегидратации может отличаться друг от друга или от природного гипса.

Целью обжига гипса является получение стабильного по составу ангидрита сульфата кальция, свойства которого не меняются с течением времени. Критерием оценки качества обжига является прочность закладочной смеси.

Для изучения природы термических процессов, проходящих при обжиге техногенного гипса, мате-

риал исследовали методами термогравиметрии (ТГА) дифференциально-термического анализа (ДТА). С целью исключения дегидратации гипса исходную гипсовую пульпу сушили до постоянной массы при температуре 55°C. Эксперимент проводился в атмосфере аргона, скорость нагрева и охлаждения составляли 15°C/мин, максимальная температура 1300°C.

Дифференциальный термический анализ показал, что процесс дегидратации техногенного гипса начинается при температуре 104°C и завершается при 232°C, он имеет ярко выраженный двойной эндотермический эффект дегидратации гипса (рис. 4). Первый эндозффект с максимумом при 158°C характеризует образование полугидрата сульфата кальция, второй — с максимумом при 186°C — связан с образованием растворимого ангидрита. По ТГ-кривой убыль массы составила 18,2%. Экзотермический эффект при 382°C обусловлен полиморфным переходом растворимого ангидрита в нерастворимый. Два эндотермических эффекта: первый в интервале температуры от 700 до 770°C (убыль массы на 1,9%) и второй в интервале температуры от 930 до 995°C (убыль массы на 2,4%) — предположительно могут отвечать разложению карбоната кальция и магнезия и ангидрита сульфата кальция соответственно.

На рис. 5 представлены экспериментальные данные по убыли массы техногенного гипса, обожженного при различной температуре в зависимости от времени выдержки. Предварительно материал сушился при 105°C, что приводило к частичной дегидратации и переходу дигидрата к полугидрату сульфата кальция.

Результаты обжига техногенного гипса, приведенные на рис. 4, показывают, что при температуре 800–900°C время, необходимое для полного обезвоживания, не превышает 20–30 мин. Незначительные флуктуации убыли массы на рис. 4 связаны с возможными отклонениями состава исходной пробы гипса по содержанию кристаллической воды и карбоната кальция. При обжиге гипса при 600°C уровень убыли

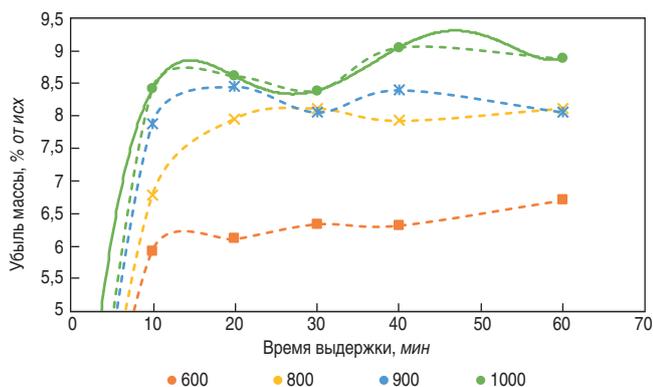


Рис. 5. Результаты обжига техногенного гипса при различной температуре
 Fig. 5. Results of firing technogenic gypsum at different temperatures

массы ниже, чем при более высокой температуре, что вероятнее всего связано в большей степени с разложением карбоната, присутствующего в пробах гипса.

Обожженный материал охлаждался на воздухе, после чего проводилось измерение влаги с помощью влагомера Sartorius MA35. В табл. 3 приведены результаты исследований по убыли массы при обжиге и значения влажности продуктов обожженного материала.

По литературным данным [15] известно, что в продуктах обжига гипса, полученных при 600°C, остается от 0,06 до 0,24% воды. Удаление последних следов влаги при различной температуре происходит замедленно и зависит от продолжительности дегидратации. По результатам многочисленных экспериментов было определено, что при температуре 850–900°C получается ангидрит стабильного состава (фаза нерастворимого ангидрита – аналог природного ангидрита).

Дальнейшие эксперименты проводили в динамических условиях – в трубчатой вращающейся печи. Перемешивание/пересыпание материала в трубчатой печи обеспечивает более быструю и полную дегидратацию. Эксперименты проводили в трубчатой печи с непрерывной загрузкой материала шнековым питателем из бункера, в процессе фиксировали время нахождения материала в зоне обжига. Предварительный подбор параметров угла наклона и скорости вращения печи позволил провести эксперименты с временем обжига 5, 10, 20, 30, 60 мин в горячей зоне. Полученные партии (1 кг) были переданы в лабораторию геотехники для испытаний в составах закладочных смесей.

Таблица 3
 Table 3

Результаты эксперимента по обжигу техногенного гипса
 The results of the experiment on the firing of technogenic gypsum

Убыль массы и остаточная влага, %						
Температура, °C	Время обжига, мин					
		10	20	30	40	60
600		5,93	6,11	6,34	6,32	6,71
		0,44	0,25	0,26	0,47	0,16
800		6,78	7,96	8,12	7,93	8,12
		0,4	0,33	0,44	0,23	0,2
900		7,88	8,45	8,06	8,4	8,06
		0,46	0,32	0,23	0,29	0,2
1000		8,41	8,61	8,39	9,05	8,88
		0,48	0,27	0,29	0,45	0,3

3. Исследование продуктов обжига

Техногенный ангидрит, так же как и исходный гипс, является дисперсным продуктом, средний размер частиц составляет 7 мкм.

Свойства ангидритов, полученных при различной температуре обжига, изучали по насыпной плотности, путем наблюдения за скоростью и степенью гидратации продуктов обжига (влагопоглотительной способностью) при хранении в условиях 60–80% относительной влажности при температуре от +10 до +3°C, а также по данным термографического анализа.

В табл. 4 приведены результаты измерений насыпного веса ангидрита, полученного при различной температуре обжига.

Насыпной вес техногенного ангидрита, полученного обжигом в ТВП, приблизительно в два раза ниже, чем природного. Насыпной вес техногенного ангидрита, полученного обжигом в КП при температуре от 600 до 900°C, имеет значения насыпной плотности гипса, просушенного при 100°C. И только при температуре обжига гипса от 1000°C насыпной вес ангидрита увеличивается и при 1200°C имеет значение, сравнимое с природным.

Для определения влагопоглощающей способности продуктов обжига (ПО) часть материала помещалась тонким слоем в открытые плоские платформы, которые хранили в указанных выше условиях в течение 28 сут и периодически взвешивали на аналитических весах (рис. 6).

Таблица 4
 Table 4

Насыпной вес ангидритов, полученных при различной температуре обжига
 Bulk weight of anhydrites obtained at different firing temperatures

Температура обжига, °C	100	600	800	900	1000	1200	Природный	850
Насыпная плотность, кг/м ³	342	321	311	348	631	1466	1405	507–640
Условия	С	С	С	С	С	С	–	Д
Примечание. С – стационарные условия обжига (камерная печь); Д – динамические условия обжига (трубчатая вращающаяся печь).								

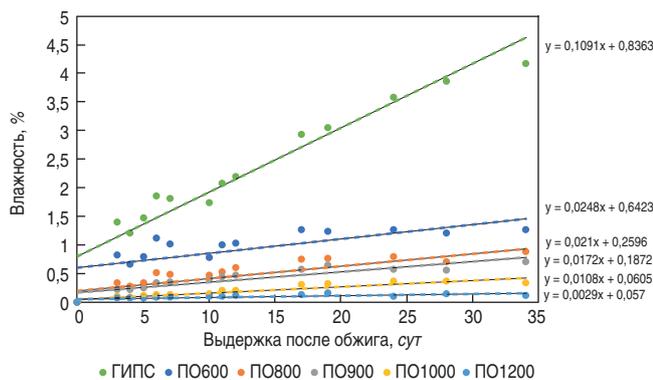


Рис. 6. Кривые набора влажности продуктов обжига техногенного гипса (ПО600, ПО800, ПО900, ПО1000, ПО1200 – продукты обжига гипса при 600, 800, 900, 1000, 1200°C соответственно)

Fig. 6. Moisture curves for gypsum calcination products (ПО600, ПО800, ПО900, ПО1000, ПО1200 – gypsum calcination products at 600, 800, 900, 1000, 1200°C, respectively)

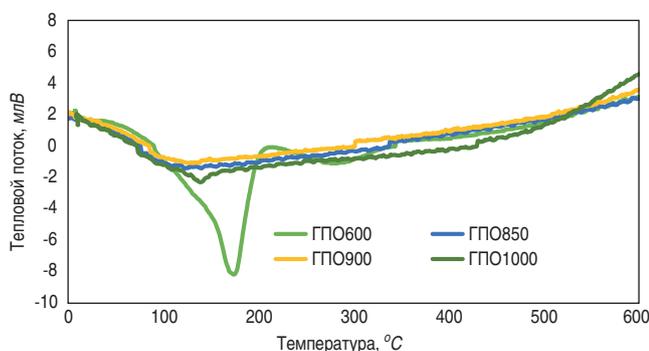


Рис. 7. Сравнение ДТА-кривых гидратированных продуктов обжига

Путем наблюдения за скоростью и степенью влагопоглощения (гидратации) продуктов обжига можно косвенно судить о наличии или отсутствии фазы растворимого ангидрита, для которого характерно обильное влагопоглощение с переходом в полугидрат. Другими словами, по влагопоглощающей спо-

собности можно судить, насколько качественно обожжен материал.

Для определения инертности продуктов обжига к гидратации исследованы методом ДТА гидратированные (затворенные водой) ангидриты, полученные в процессе обжига техногенного гипса при различной температуре.

На термоаналитических кривых (рис. 7) видно, что у гидратированного продукта обжига (ГПО) при 600°C присутствует резко выраженный эндотермический эффект, соответствующий переходу полугидрата сульфата кальция в растворимый ангидрит.

У гидратированных продуктов обжига при 800, 900, 1000°C эндотермические эффекты слабо выражены или отсутствуют. Это свидетельствует об инертности продуктов обжига к гидратации, т. е. доминирующему содержанию нерастворимого ангидрита в пробе и отсутствию растворимого ангидрита, который подвержен преобразованию в полугидрат сульфата кальция.

Проведенные эксперименты показывают, что продукты, полученные в процессе обжига при температуре 800°C и выше, негигроскопичны в отличие от продуктов, полученных в процессе обжига при 600°C.

Испытания закладочных смесей

На первом этапе с использованием опытных партий ангидрита выполняется затворение закладочных смесей наиболее распространенной марки АЩЦ М30 (ангидрит-шлак-цемент, прочность при одноосном сжатии 3 МПа в возрасте 180 сут) с заменой природного ангидрита на искусственный. Отличием в способе приготовления смеси является то, что при подготовке состава с природным ангидритом осуществляется совместный помол кусков ангидрита со шлаком. Полученный искусственным путем ангидрит после обжига имеет структуру высокодисперс-

Таблица 5
Table 5

Реологические свойства закладочных смесей на искусственном ангидрите
Rheological properties of filling mixtures on artificial anhydrite

Марка закладочной смеси	Плотность смеси, кг/м ³	Растекаемость по Суттарду, см через мин			Фактический состав закладочной смеси, кг/м ³			
		0	15	30	Цемент	Шлак	Ангидрит	Вода
Базовый состав АЩЦ М30 по РТПП	2050	33	31	31	50	750	700	550
АЩЦ М30 600	1733,17	35	32	27	39	551	527	617
АЩЦ М30 800	1671,05	32	27	26	35	500	502	634
АЩЦ М30 900	1702,86	33	25	24,5	35	493	526	649
АЩЦ М30 1000	1694	34	32	31	38	538	530	588
АЩЦ КП30 850	1785,7	32	30	30	37	528	561	660
АЩЦ ТВП 5	1671,15	35	36	39,5	34	490	512	635
АЩЦ ТВП 10	1709,3	36	39	41,5	36	514	532	628
АЩЦ ТВП 20	1804,37	33	34	33	39	555	594	616
АЩЦ ТВП 30	1852,1	32	29	29	41	590	601	620
АЩЦ ТВП 60	1910,55	31	30	29	42	605	659	605

Таблица 6
Table 6

Прочность составов закладочных смесей при различных режимах обжига
The strength of the compositions of backfill mixtures in various firing modes

Марка закладочной смеси	Температура обжига, °С	Время обжига, мин	Плотность кубов		Прочность при одноосном сжатии, МПа	
			28 сут	45 сут	28 сут	45 сут
Базовый состав АЩЦ М30 по регламенту	–	–	2,1	2,1	1,5	2
АЩЦ КП30	850	30	1,64	1,64	1,2	1,38
АЩЦ ТВП 5	850	5	1,89	1,7	1,22	1,71
АЩЦ ТВП 10	850	10	1,9	1,86	1,3	1,64
АЩЦ ТВП 20	850	20	1,9	1,91	1,13	1,42
АЩЦ ТВП 30	850	30	1,51	1,51	2,02	1,29
АЩЦ ТВП 60	850	60	1,63	1,71	3,19	3,71

ного порошкообразного материала, не требует дополнительного помола и объединяется со шлаком путем смешивания.

По сравнению с базовым АЩЦ М30 на природном ангидрите вне зависимости от технологии получения искусственного ангидрита плотность составов на искусственном продукте ниже, а водопотребность больше вследствие малого размера частиц; природный ангидрит при мельничном способе подготовки такого тонкого помола не достигает. Реологические свойства экспериментальных смесей представлены в табл. 5.

Для оценки прочности из закладочной смеси формируются образцы-кубы и испытываются в контрольные сроки твердения (рис. 8), для пилотных испытаний контрольными являются 28 и 45 сут.

Таким образом, на стадии пилотных испытаний с учетом весьма малого количества пробных партий ангидрита оценена перспективность составов на 28-е и 45-е сут твердения.

Составы с ангидритами, полученными при обжиге техногенного гипса в ТВП в течение 5, 10, 20, 30 мин при температуре 850°С, имеют результаты по прочности, весьма близкие к базовому составу, в соответствии с действующим на производстве регламентом (табл. 6). Важно учитывать, что ввиду более высокой водопотребности смесей с искусственным ангидритом в ранние сроки набор прочности может быть менее интенсивным. При этом существенной разницы прочности в составах с временем обжига в диапазоне 5–30 мин не установлено. Наилучший результат показал состав с ангидритом ТВП 60, продемонстрировав уже на 28-е сут марочную прочность, что позволяет сделать вывод о проявлении выраженных вяжущих свойств.

Выводы

Техногенный гипс – дисперсный продукт нейтрализации серной кислоты пульпой известняка Каларгонского месторождения. Средний размер ча-



Рис. 8. Формовка образцов-кубов и испытание на контрольный срок
Fig. 8. Shaping of sample-cubes and testing for the control period

стиц порядка 10 мкм. Основу материала составляет дигидрат сульфата кальция, в составе также присутствуют карбонаты кальция и магния, оксиды железа, кремния, алюминия и др. Методом РЭМ–РСМА определено наличие микропримесей сульфидов железа и сульфидов цветных металлов в исходном гипсе.

Техногенный ангидрит – продукт обжига техногенного гипса, основная фаза – ангидрит сульфата кальция, в составе также присутствуют оксиды железа, кремния, кальция, алюминия, магния и др. Продукт обжига является дисперсным (средний размер 7 мкм).

По параметрам обжига

Проведенные лабораторные эксперименты по выбору параметров обжига показали, что техногенный гипс обжигается и становится ангидритом начиная с 800°С. Минимально необходимые температурные параметры обжига: температура 850–900°С, время обжига не более одного часа в горячей зоне.

По влагопоглощению

Влагопоглощение обожженного материала незначительно. С повышением температуры обжига техногенного гипса продукт обжига становится ме-

нее гигроскопичным. При этом разница менее заметна в области более высокой температуры. Продукт обжига техногенного гипса, полученный при 600°C, за месяц хранения на воздухе при относительной влажности до 80% набрал около 1,5% влаги; продукт обжига, полученный при 800°C набрал не более 1%, а продукт обжига при 1000°C набрал менее 0,5% влаги.

Путем наблюдения за скоростью и степенью влагопоглощения (гидратации) продуктов обжига мы можем косвенно судить о наличии или отсутствии фазы растворимого ангидрита, для которого харак-

терно обильное влагопоглощение с переходом в полугидрат.

По использованию в закладочных смесях

Испытания закладочных смесей с заменой природного ангидрита техногенным, полученным при различных условиях обжига, показали возможность применения закладки с техногенным материалом. В рамках данного направления исследований запланирована наработка партии ангидрита в укрупненном масштабе с проведением длительных испытаний закладочных смесей на срок твердения до 180 сут.

Список литературы

1. Федорчук Ю.М., Похолков Ю.П., Цыганкова Т.С., Михеев В.Н. Способ утилизации и применения техногенного ангидрита, полученного из отходящих серосодержащих газов // *Экология и промышленность России*. 2012. № 7. С. 34–35. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-7-34-35>
2. Федорчук Ю.М. Оценка влияния примесей на свойства техногенного ангидрита // *Строительные материалы*. 2004. № 3. С. 56–57.
3. Гуревич Б.И., Тюкавкина В.В. Утилизация сульфатных отходов сернокислотной переработки металлургического сырья // *Цветные металлы*. 2012. № 6. С. 69–72.
4. Монтянова А.Н., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Вильчинский В.Б., Наговицин Ю.Н. Опыт и эффективность применения пластифицированных закладочных смесей // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2019. Т. 17. № 1. С. 18–25.
5. Гальцева Н.А., Бурьянов А.Ф., Буддыжова К.Н., Соловьев В.Г. Использование синтетического ангидрита сульфата кальция для приготовления закладочных смесей // *Строительные материалы*. 2015. № 6. С. 76–77.
6. Бондаренко С.А. Перспективы использования ангидритового вяжущего в промышленности строительных материалов. Материалы 60-й юбилейной научной конференции ЮУрГУ. Челябинск, 2008.
7. Озеров С.С., Цемехман Л.Ш., Тозик В.М., Пахомов Р.А. Исследование процесса непрерывного конвертирования сульфидных медно-никелевых материалов с получением «сырой» меди // *Цветные металлы*. 2020. № 12. С. 70–76.
8. Крупнов Л.В., Пахомов Р.А., Старых Р.В., Таланов В.А. Изменение динамики газопылевого потока в печи взвешенной плавки Надеждинского металлургического завода при установке защитного козырька. Ч. 1. Модельные расчеты // *Цветные металлы*. 2021. № 10. С. 63–80.
9. Кисель А.А., Гузанов П.С., Лытнева А.Э., Гец О.А. Результаты лабораторных исследований закладоч-

References

1. Fedorchuk Yu.M., Pokholkov Yu.P., Tsygankova T.S., Mikheev V.N. The method of utilization and application of technogenic anhydrite obtained from waste sulfur-containing gases. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2012. No. 7, pp. 34–35. (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-7-34-35>
2. Fedorchuk Yu.M. Evaluation of the influence of impurities on the properties of technogenic anhydrite. *Stroitel'nye Materialy*. [Construction Materials]. 2004. No. 3, pp. 56–57. (In Russian).
3. Gurevich B.I., Tyukavkina V.V. Utilization of sulfate wastes of sulfuric acid processing of metallurgical raw materials. *Tsvetnye metally*. 2012. No. 6, pp. 69–72. (In Russian).
4. Montyanova A.N., Trofimov A.V., Rumyantsev A.E., Vilchinsky V.B., Nagovitsin Yu.N. Experience and effectiveness of the use of plasticized stowing mixtures. *Vestnik of the Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2019. Vol. 17. No. 1, pp. 18–25. (In Russian).
5. Galtseva N.A., Buryanov A.F., Buldyzhova K.N., Solovyov V.G. The use of synthetic calcium sulfate anhydrite for the preparation of backfill mixtures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 6, pp. 76–77. (In Russian).
6. Bondarenko S.A. Prospects for the use of anhydrite binder in the building materials industry. Materials of the 60th Anniversary Scientific Conference of SUSU. Chelyabinsk. 2008. (In Russian).
7. Ozerov S.S., Tsemekhman L.Sh., Tozik V.M., Pakhomov R.A. Investigation of the process of continuous conversion of sulfide copper-nickel materials with the production of “raw” copper. *Tsvetnye metally*. 2020. No. 12, pp. 70–76. (In Russian).
8. Krupnov L.V., Pakhomov R.A., Starykh R.V., Talanov V.A. Changes in the dynamics of the gas and dust flow in the flash smelting furnace of the Nadezhda Metallurgical Plant during the installation of a protective cap. Part 1. Model calculations. *Tsvetnye metally*. 2021. No. 10, pp. 63–80. (In Russian).
9. Kisel A.A., Guzanov P.S., Lytneva A.E., Gets O.A. Results of laboratory studies of filling mixtures using artificial components. *Gornyy zhurnal*. 2020. No. 6, pp. 69–75. (In Russian).

- ных смесей с использованием искусственных компонентов // *Горный журнал*. 2020. № 6. С. 69–75.
- Справочник по производству гипса и гипсовых изделий / Под ред. К.А. Зубарева М.: Госстройиздат, 1963. 464 с.
 - Tydlitat V., Medved I., Cerny R. Determination of a partial phase composition in calcined gypsum by calorimetric analysis of hydration kinetics // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. Vol. 109, pp. 57–62. DOI: 10.1007/s10973-011-1334-y
 - Гипсовые материалы и изделия / Под ред. А.В. Ферронской. М.: АСВ, 2004. 488 с.
 - Клименко В.Г. Гипсоангидритовые вяжущие вещества // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 4. С. 19–23.
 - Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.
 - Гипс и фосфогипс: Сборник работ по химической переработке гипса и фосфогипса / Под ред. акад. С.И. Вольфовича. М.: Госхимиздат, 1958. 304 с.
 - Spravochnik po proizvodstvu gipsa i gipsovykh izdeliy [Handbook for the production of gypsum and gypsum products. Ed. By Zubareva K.A.]. Moscow: Gosstroyizdat. 1963. 464 p.
 - Tydlitat V., Medved I., Cerny R. Determination of a partial phase composition in calcined gypsum by calorimetric analysis of hydration kinetics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. Vol. 109, pp. 57–62. DOI: 10.1007/s10973-011-1334-y
 - Gipsovyye materialy i izdeliya [Gypsum materials and products. Ed. By Ferronskaya A.V.] Moscow: ASV, 2004. 488 p.
 - Klimenko V.G. Gypsum anhydrite binders. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2011. No. 4, pp. 19–23. (In Russian).
 - Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov [Chemical technology of binders]. Moscow: Vysshaya shkola. 1980. 472 p.
 - Gips i fosfogips. Sbornik rabot po khim. pererabotke gipsa i fosfogipsa [Gypsum and phosphogypsum. Collection of works on chem. processing of gypsum and phosphogypsum. Ed. by Volkovich S.I.] Moscow: Goshimizdat. 1958. 304 p.

 **ИнтерСтрой
Экспо**

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
строительных, отделочных материалов
и инженерного оборудования

16|17|18 АПРЕЛЯ 2024

Санкт-Петербург, КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге

 Международная
Выставочная
Компания

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

Забронируйте стенд:
interstroyexpo.com



**КОНГРЕСС
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ IBC**



УДК 666.533

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-35-41>

С.А. ОТМАН АЗМИ¹, аспирант (azmiothman2222@gmail.ru),
 Н.В. ЧЕРНЫШЕВА¹, д-р техн. наук, доцент, профессор (chernysheva56@rambler.ru),
 В.П. ДЕНИСОВ¹, канд. техн. наук, заведующий лабораторией кафедры автомобильных и железных
 дорог (wpdbel@mail.ru); М.Ю. ДРЕБЕЗГОВА², канд. техн. наук, доцент (mdrebezgova@mail.ru)

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

Влияние зернового состава заполнителя на свойства штукатурных растворов на основе композиционного гипсового вяжущего

Особое место среди современных материалов в Палестине занимают отделочные материалы, от эффективности которых зависит архитектурная выразительность и эстетика градостроительства, а также создание комфортных условий проживания, рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и многое другое. В стране традиционно для внутренней и наружной отделки зданий и сооружений используют цементно-песчаную штукатурку импортного производства. В связи с этим актуальна разработка конкурентно-способных отделочных материалов нового поколения (штукатурных растворов) на основе композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) повышенной водостойкости, которые отвечают высоким требованиям по качеству продукции, эксплуатационным и экологическим характеристикам, а также энергетическим затратам на их производство и способны заменить импортные аналоги. В работе представлены результаты определения гранулометрического состава штукатурного раствора на основе композиционного гипсового вяжущего (КГВ) с заполнителем из некондиционных барханных кварцевых песков и песчаной фракции отсева дробления известняка путем расчетно-экспериментального моделирования по известным уравнениям идеальных кривых. Было установлено, что исследуемые пески не вписываются в график с областью нормируемого зернового состава. С целью получения оптимального гранулометрического состава заполнителя, приближенного к идеальной кривой Фуллера и обеспечивающего наиболее плотную упаковку в штукатурном растворе на основе КГВ, была рассмотрена возможность его обогащения путем смешивания двух видов кварцевых песков с песчаной фракцией отсева дробления известняка. Для этого с применением программы «Granlab» был рассчитан оптимальный гранулометрический состав мелкого заполнителя из смеси трех разных песков месторождений Палестины. Совокупное влияние дозировки, а также гранулометрического состава КГВ и оптимизированной смеси заполнителей с достаточно плотной упаковкой частиц позволило достичь минимальной водопотребности штукатурных смесей при требуемой удобоукладываемости и повысить прочность затвердевшего раствора в 28-суточном возрасте на 35%.

Ключевые слова: отделочные материалы, композиционное гипсовое вяжущее, штукатурные растворы, гранулометрический состав.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Денисов В.П., Дребезгова М.Ю. Влияние зернового состава заполнителя на свойства штукатурных растворов на основе композиционного гипсового вяжущего // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-35-41>

S.A. OTHMAN AZMI¹, Postgraduate (azmiothman2222@gmail.ru), N.V. CHERNYSHEVA¹, Doctor of Sciences (Engineering), Docent, Professor (chernysheva56@rambler.ru), V.P. DENISOV¹, Candidate of Sciences (Engineering), Head of the Laboratory of the Department of Automobile and Railways (wpdbel@mail.ru); M.Yu. DREBEZGOVA², Candidate of Sciences (Engineering), Docent (mdrebezgova@mail.ru)

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Polytechnicheskaya Street, St. Petersburg, 195251, Russian Federation)

Influence of the Grain Composition of the Aggregate on the Properties of Plaster Solutions Based on a Composite Gypsum Binder

A special place among modern materials in Palestine is occupied by finishing materials, the effectiveness of which determines the architectural expressiveness and aesthetics of urban planning, as well as the creation of comfortable living conditions, the rational use of fuel and energy resources, and much more. In the country, traditionally, imported cement-sand plaster is used for interior and exterior decoration of buildings and structures. In this regard, it is relevant to develop competitive finishing materials of a new generation (plaster mortars) based on composite gypsum binders (CGB) with increased water resistance, which meet high requirements for product quality, operational and environmental characteristics, as well as energy costs for their production, and capable of replacing imported analogues. The paper presents the results of determining the granulometric composition of a plaster mortar based on a composite gypsum binder (CGB) with a filler of substandard dune quartz sands and a sand fraction of limestone crushing by computational and experimental modeling according to known equations of ideal curves. It was found that the studied sands do not fit into the schedule with the area of normalized grain composition. In order to obtain the optimal granulometric composition of the aggregate, close to the ideal Fuller curve and providing the most dense packing in the plaster mortar based on CGB, the possibility of its enrichment by mixing two types of quartz sands with the sandy fraction of limestone crushing screenings was considered. For this purpose, using the Granlab program, the optimal granulometric composition of a fine filler from a mixture of 3 different sands of the Palestine deposits was calculated. The combined effect of the dosage, as well as the granulometric composition of the CGB and the optimized mixture of aggregates with a sufficiently dense packing of particles, made it possible to achieve the minimum water demand of plaster mixtures with the required workability and to increase the strength of the hardened solution at 28 days of age by 35%.

Keywords: finishing materials, composite gypsum binder, plaster solutions, granulometric composition.

The work was carried out within the framework of the “Priority 2030” Program on the basis of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov using the equipment of the High Technology Center of the V.G. Shukhov BSTU.

For citation: Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Denisov V.P., Drebezgova M.Yu. Influence of the grain composition of the aggregate on the properties of plaster solutions based on a composite gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 35–41. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-35-41>

В настоящее время в Палестине одним из прогрессивных направлений строительной отрасли является «зеленое» строительство зданий и сооружений по инновационным технологиям из экологически чистых строительных материалов с гарантированным обеспечением современных требований по качеству, номенклатуре, энергоэффективности, экологическим и прочим требованиям, приближенным к стандартам Европейского союза [1].

Для реализации этого направления потребуется значительное количество эффективных строительных материалов с преимущественным использованием для их изготовления местного сырья природного и техногенного происхождения, что позволит уменьшить негативное воздействие на окружающую среду и решить экономические проблемы в стране. Особое место среди современных материалов занимают отделочные материалы, от эффективности которых зависит архитектурная выразительность и эстетика градостроительства, а также создание комфортных условий проживания, рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и многое другое.

В Палестине традиционно для внутренней и наружной отделки зданий и сооружений используют цементно-песчаную штукатурку импортного производства [2].

В связи с этим актуальна разработка конкурентно-способных отделочных материалов нового поколения (штукатурных растворов и др.) на основе композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) повышенной водостойкости, которые отвечают высоким требованиям по качеству продукции, эксплуатационным и экологическим характеристикам, а также энергетическим затратам на их производство и смогут заменить импортные аналоги [3–8].

Достижению требуемых эксплуатационных характеристик штукатурных растворов на основе КГВ в большой степени способствует повышение плотности твердеющей системы за счет оптимизации зернового состава заполнителя.

В связи с этим целью исследования явилась разработка штукатурных растворов на КГВ с оптимальным зерновым составом мелкого заполнителя из материалов местной сырьевой базы Палестины (кварцевых песков и песчаной фракции отсева дробления известняка) с требуемыми технико-эксплуатационными характеристиками.

На современном уровне материаловедения решение задачи оптимизации качества мелкого заполнителя и его влияния на технологические и строительно-технические свойства растворов смесей и затвердевших штукатурных растворов на КГВ должно базироваться на определении:

- гранулометрического состава заполнителя с оптимальным числом зерен средних и мелких размеров;
- предельного размера зерен, их формы и оценки шероховатости поверхности с учетом минералогического состава заполнителя и содержания в нем вредных примесей;

– наименьшей межзерновой пустотности и водопотребности заполнителя, имеющих определяющее значение для реологии дисперсных систем и др.

Для приготовления качественных штукатурных растворов на КГВ песок должен обладать наименьшим объемом пустот. Чем выше удельная поверхность песка и его пустотность, тем должно быть больше в растворяющей смеси гипсоцементного теста для создания необходимой обкладки отдельных песчинок и заполнения пространства между ними.

По мнению авторов [9], в штукатурных растворах предпочтение следует отдавать пескам с непрерывной гранулометрией (присутствуют частицы всех размеров), так как в смесях с прерывистым зерновым составом (отсутствуют частицы промежуточных размеров) ограничивается подвижность мелких зерен, защемленных между крупными, и потребуется дополнительное количество гипсоцементного теста для обеспечения их необходимой удобоукладываемости. К тому же отмечается, что растворные смеси с прерывистым зерновым составом более склонны к расслоению.

Таким образом, необходимо более детальное изучение вопросов оценки гранулометрического состава мелкого заполнителя в штукатурных растворных смесях на основе КГВ.

Гранулометрический состав заполнителя может быть улучшен двумя способами: смешиванием фракций или выбором эталонной (идеальной) кривой гранулометрического состава.

При определении оптимальной гранулометрии заполнителей в практике строительного материаловедения и технологии строительных композиционных материалов в основном пользуются графиком, на котором выделена область нормируемого зернового состава (качественных песков), если их характеристики соответствуют так называемой идеальной кривой просеивания [10], на которой определены допустимые пределы колебаний их гранулометрического состава (рис. 1).

Для получения идеальной кривой просеивания бывает недостаточно одного или двух видов мелких

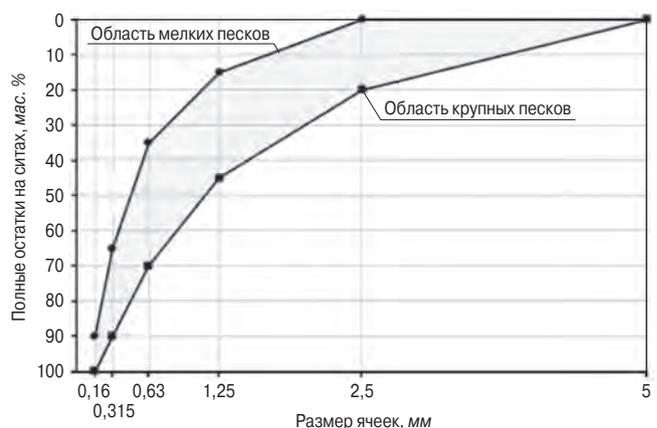


Рис. 1. Область нормируемого зернового состава качественных песков
Fig. 1. Area of normalized grain composition of quality sands

Таблица 1
Table 1

Гранулометрический оптимизированный состав песка
(по Фуллеру)
Granulometric optimized sand composition
(according to Fuller)

Остатки на ситах, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Остаток на дне
Проход через сито, мас. %	100	70,7	50,2	35,5	25,3	0
Частные остатки, %	0	29,3	20,5	14,7	10,2	0
Полные остатки, %	0	29,3	49,8	64,5	74,7	100

заполнителей, так как их гранулометрический состав далек от оптимального [11–17]. В таком случае необходимо вводить дополнительно еще один компонент или проводить корректировку соотношений между уже имеющимися видами заполнителей в проектируемой растворной смеси. В связи с этим применение простых методик подбора оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей, заключающихся в нахождении наилучшего соотношения между их частицами разной крупности с целью обеспечения минимальной межзерновой пустотности, оказывается недостаточным.

Для идеальных кривых предлагаются различные методы расчета и кривые просеивания – Фуллера, Боломея, Гуммеля, Даля, Абрамса, А.Н. Хархардина, В.В. Белова и др. [15–17]. По Фуллеру идеальная гранулометрическая кривая (табл. 1, рис. 2) описывается уравнением:

$$A = 100 \cdot \sqrt{\frac{d_i}{D}}, \% \quad (1)$$

где A – проход через сито с d , мм, выраженный, мас. %; d_i – размер ячейки сита, мм; D – наибольший размер зерна в смеси, мм.

С учетом анализа способов расчета наиболее плотной упаковки заполнителей для оценки их влияния на свойства штукатурного раствора на КГВ изучался зерновой состав двух видов кварцевых песков и песчаной фракции отсева дробления известняка месторождений Палестины (в соответствии с ГОСТ 8735–88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний» и ГОСТ 8736–2014

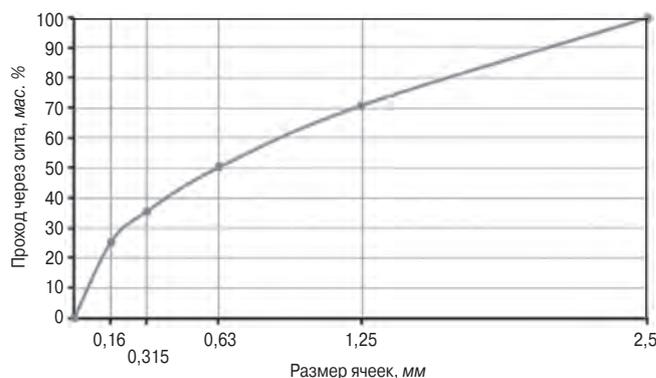


Рис. 2. Идеальная гранулометрическая кривая по Фуллеру
Fig. 2. Ideal Fuller grain size curve

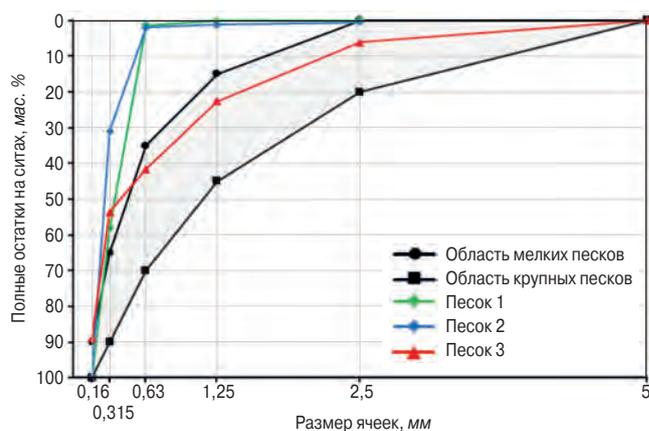


Рис. 3. Гранулометрические кривые используемых песков
Fig. 3. Granulometric curves of the sands used

«Песок для строительных работ. Технические условия»). Химический состав исследуемых песков представлен в табл. 2.

Количество илистых и глинистых частиц в кварцевых песках составило: в песке № 1 – менее 2%; в песке № 2 – менее 3%, что соответствует требованиям ГОСТ 8735–88. В соответствии с ГОСТ 28013–98 «Растворы строительные. Общие технические условия» для штукатурных растворов не допускается содержание зерен заполнителя крупностью более 2,5 мм.

В работе был выполнен рассев исследуемых заполнителей по фракциям с помощью стандартного набора сит (табл. 3).

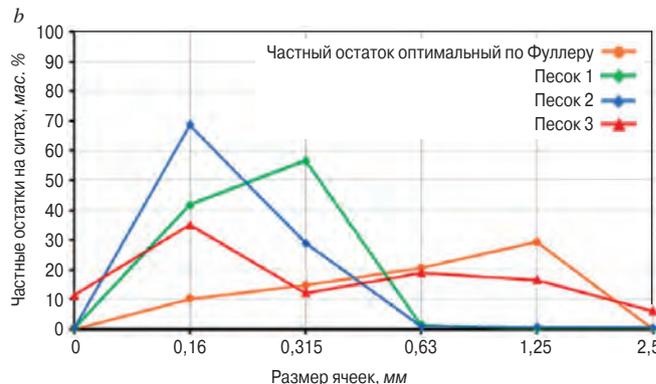
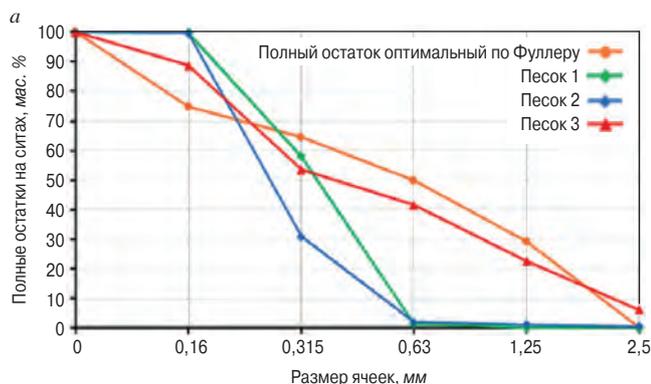


Рис. 4. Кривые рассеивания исследуемых песков в сравнении с оптимальной кривой Фуллера: а – по полным остаткам; б – по частным остаткам
Fig. 4. Dispersion curves of the studied sands in comparison with the optimal Fuller curve: a – for total residues; b – by private balances

Таблица 2
Table 2

Химический состав исследуемых заполнителей
Chemical composition of the studied fillers

Пески Палестины	Химический состав, мас. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O	ППП
Кварцевый песок № 1 (П ₁)	91	4,5	0,3	2,6	0,3	0	0	0,7	0,5	0,1
Кварцевый песок № 2 (П ₂)	85,3	10,9	0,6	0,6	0,8	0	0	0,9	0,5	0,4
Песчаная фракция отсева дробления известняка (П ₃)	7,4	2,9	1,1	57,2	30,5	0,1	0	0,4	0	0,4

Таблица 3
Table 3

Результаты отсева заполнителей
Aggregate sieving results

Остатки на ситах, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Меньше 0,16
1. Кварцевый песок M _K =1,59						
Частные остатки, %	0	0,05	1,35	56,7	41,75	0,15
Полные остатки, %	0	0,05	1,355	58,055	99,805	100
2. Кварцевый песок M _K =1,34						
Частные остатки, %	0,55	0,7	0,8	28,9	68,7	0,35
Полные остатки, %	0,55	1,25	2,05	30,95	99,65	100
3. Песчаная фракция отсева дробления известняка M _K =2,13						
Частные остатки, %	6,15	16,5	18,9	12,2	35	11,25
Полные остатки, %	6,15	22,65	41,55	53,75	88,75	100

Таблица 4
Table 4

Диапазон зернового состава заполнителя относительно идеальной кривой Фуллера
The range of aggregate grain composition relative to the ideal Fuller curve

Размер ячеек, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Дно
Диапазон слева 5%	100	87,9	71	35	22,6	0	0
Диапазон справа 5%	100	97,9	81	45	32,6	5	5

Было установлено, что исследуемые пески в соответствии с требованиями ГОСТ 8736–93* относятся: *по зерновому составу* – ко II классу; *по крупности*: мелкий с M_K=1,59 (кварцевый песок П₁), очень мелкий с M_K=1,34 (кварцевый песок П₂) и средний с M_K=2,13 (песчаная фракция отсева дробления известняка П₃) – и не вписываются по гранулометрическому составу в график с областью нормируемого зернового состава (рис. 3).

Оценка песка по модулю крупности весьма приближенная, так как при разном модуле крупности разные виды песков могут существенно отличаться по удельной поверхности и пустотности.

Далее с целью получения оптимального гранулометрического состава заполнителя, приближенного к идеальной кривой Фуллера и обеспечивающего наиболее плотную упаковку в штукатурном растворе на КГВ, была рассмотрена возможность его обогащения путем смешивания двух видов кварцевых песков с песчаной фракцией отсева дробления известняка. Для каждого вида заполнителя рассчитывали гранулометрический состав частиц с помощью уравнения оптимальной кривой Фуллера, а затем строили кривые рассеивания (по полному проходу частиц через

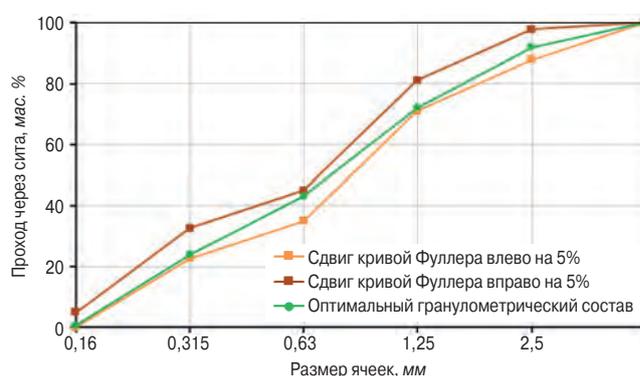


Рис. 5. Графическое изображение идеальной области гранулометрии частиц оптимизированной смеси заполнителей
Fig. 5. Graphic representation of the ideal particle size distribution area of the optimized mixture of aggregates

сита и по частным остаткам) и проводили сравнение с оптимальным составом (рис. 4).

Полученные расчетные данные вводились в программу «Granlab» (<http://dorsoft.ru/>), предназначенную для автоматизированного расчета оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей, в сравнении с идеальной кривой распределения Фуллера по полному проходу через каждое сито.

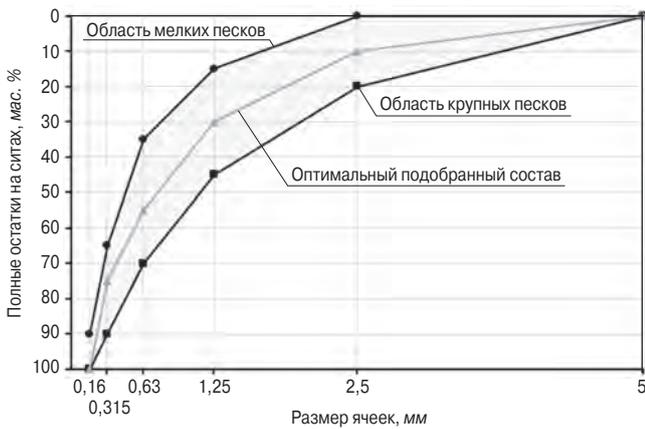


Рис. 6. Разработанный оптимальный гранулометрический состав заполнителя в области нормируемого зернового состава качественных песков
Fig. 6. Developed optimal granulometric composition of the aggregate in the area of normalized high-quality sands

В качестве основного критерия оптимальности рассматривали величину расхождения рассчитанного гранулометрического состава с идеальной кривой распределения частиц.

В связи с тем, что идеальная кривая просеивания дает только приблизительный состав максимальной упаковки частиц заполнителя со сферической формой и не в полной мере учитывает возможные отклонения от реальной, было предложено, не выходя из норм зернового состава, расширить диапазон для идеальной кривой Фуллера со сдвигом на каждом сите влево и вправо на 5%, что обеспечит более гибкое регулирование зернового состава смеси заполнителей благодаря варьированию количеством рассматриваемых фракций (табл. 4).

С помощью программы «Granlab» исследуемые заполнители были разделены на пять частей (табл. 5).

Результаты расчета количественного содержания разделенных заполнителей оптимального гранулометрического состава представлены в табл. 6. Графическое изображение идеальной области гранулометрии частиц смеси заполнителей представлено на рис. 5.

Было установлено, что рассчитанный с помощью программы «Granlab» гранулометрический состав заполнителя полностью соответствует выделенной области нормируемого зернового состава качественных песков (рис. 6). С целью проверки адекватности расчетного способа нахождения оптимального гранулометрического состава смеси исследуемых заполнителей определяли их насыпную плотность. Было установлено, что состав заполнителя, рассчитанный с применением программы «Granlab», отличается максимальной насыпной плотностью и минимальной пустотностью (табл. 7).

С учетом величины истинной плотности кварцевого песка, равной 2540 кг/м^3 , и истинной плотности известняка – 2600 кг/м^3 расчетная пустотность для П_1 , П_2 , П_3 и оптимальной смеси заполнителей составила 39,5; 41,1, 38,5 и 31,7%, а снижение пустотности по отношению к исходным пескам – 24,6;

Таблица 5
Table 5

Полный проход частиц разделенных заполнителей через ячейки сит
Complete passage of separated filler particles through the sieve cells

№	Песок	Размер ячеек сит, мм					
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Полный проход частиц через ячейки сит, %							
1	П_{1-1}	100	100	98,6	41,9	0,2	0
2	П_{2-1}	98,2	96	93,4	0	0	0
3	П_{2-2}	100	100	100	100	0,5	0
4	П_{3-1}	85,2	45,5	0	0	0	0
5	П_{3-2}	100	100	100	79,1	19,3	6,8

Примечания: П_1 – песок оставлен без изменения; П_2 – песок разделен на две части: первая часть (П_{2-1}) с размером ячеек от 2,5 до 0,63 мм; вторая часть (П_{2-2}) с размером ячеек 0,16 мм; П_3 – песок разделен также на две части: первая часть (П_{3-1}) с размером ячеек 2,5–1,25 мм; вторая часть (П_{3-2}) с размером ячеек от 0,315 до 0,16 мм.

Таблица 6
Table 6

Содержание частиц заполнителей оптимального гранулометрического состава
The content of filler particles of optimal granulometric composition

№	Песок	Содержание, %	Размер ячеек сит, мм					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
1	П_{1-1}	39,51	39,5	39,5	39	16,6	0,1	0
2	П_{2-2}	6,05	6,1	6,1	6,1	6,1	0	0
3	П_{3-1}	54,44	46,4	24,8	0	0	0	0

Таблица 7
Table 7

Насыпная плотность и пустотность исследуемых заполнителей
Bulk density and voidness of the studied fillers

Песок	Насыпная плотность, кг/м^3	Пустотность, %
П_1	1540	39,5
П_2	1501	41,1
П_3	1600	38,5
Оптимальный состав	1635	31,7

29,7 и 21,5%, соответственно. Насыпная плотность оптимальной смеси заполнителей с $M_K=2,2$ составила 1635 кг/м^3 .

Далее из штукатурных растворов на основе КГВ с использованием оптимизированной смеси заполнителей (при соотношении песков, мас. %: $\text{П}_{1-1}:\text{П}_{2-2}:\text{П}_{3-1}=39,5:6,0:54,5$ соответственно) были заформованы образцы-кубы размером $7,07 \times 7,07 \text{ см}$, испытанные в возрасте 2 ч, 7 и 28 сут. В исследуемых составах использовали химические добавки: замедлитель сроков схватывания Plast Retard PE (0,08%) и суперпластификатор Melflux 1461 F (0,2%).

**Таблица 8
Table 8**

**Состав и свойства штукатурных растворов на КГВ
Composition and properties of plaster solutions on KGV**

№	Доля вяжущего к заполнителю	В/вяж	Начало схватывания, мин	Подвижность, мм	R _{сж} , МПа, через			Кр
					2 ч	7 сут	28 сут (влажный/сухой)	
1	1:2	0,5	52	150	2,9	9,5	10,2/12,1	0,69
2	1:2*	0,49	51	150	3,1	10	13,8/17,8	0,72

Примечание. * Составы штукатурных растворов с заполнителем оптимальной granulometрии.

Зависимости свойств затвердевших штукатурных растворов на КГВ от рецептурных факторов представлены в табл. 8.

Следует отметить, что разработанное ранее коллективом авторов пятикомпонентное КГВ [3–5] включает 68% гипсового вяжущего (Г-5 Б-II–70% и ГВВС-16–30%); 10% портландцемента; 20% тонкодисперсного кварцевого песка; 0,5% метаксаолина ВМК-45 и 1,5% известняковой пыли. Гранулометрический состав КГВ отклоняется от оптимального, рассчитанного с помощью компьютерной программы по уравнению кривой Функа–Дингера, на 15,3%.

Список литературы

1. Babaa Mutasim, Sameh Monna, Muhannad Haj Hussein, Abdel-Fattah Hassan Fuad Baba. Green Buildings Guideline – Palestine Second Edition 2022. 176 .
2. Тайех Джеhad. Ограждающие конструкции современного строительства в условиях жаркого климата Палестины // *Вестник МГСУ*. 2008. № 3. С. 22–26.
3. Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Масалитина С.В. Состав и свойства композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-81-88>
4. Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Масалитина С.В. Особенности структурообразования композиционных гипсовых вяжущих с комплексом минеральных и органических добавок // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2023. Т. 8. № 4. С. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33
5. Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Марголис Б.И., Новиченкова Т.Б. Влияние гранулометрического состава композиционного гипсового вяжущего на его свойства // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2023. № 6. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-17-25
6. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного

Совокупное влияние дозировки, а также гранулометрического состава КГВ и оптимизированной смеси заполнителей с достаточно плотной упаковкой частиц позволило достичь минимальной водопотребности штукатурных смесей при требуемой удобоукладываемости и повысить прочность затвердевшего раствора в 28-суточном возрасте на 35% (табл. 8).

Таким образом, с применением программы «Granlab» был рассчитан оптимальный гранулометрический состав мелкого заполнителя из смеси трех разных песков месторождений Палестины.

References

1. Babaa Mutasim, Sameh Monna, Muhannad Haj Hussein, Abdel-Fattah Hassan Fuad Baba. Green Buildings Guideline – Palestine Second Edition 2022. 176 p.
2. Tayeh Jehad. Enclosing structures of modern construction in the hot climate of Palestine. *Vestnik of MUCE*. 2008. No. 3, pp. 22–26. (In Russian).
3. Othman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Masalitina S.V. Composition and properties of composite gypsum binder with increased water resistance. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 5, pp. 81–88. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-81-88>
4. Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Masalitina S.V. Features of structure formation of composite gypsum binders with a complex of mineral and organic additives. *Vestnik of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2023. Vol. 8. No. 4, pp. 24–33. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33
5. Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Margolis B.I., Novichenkova T.B. Influence of particle size distribution of composite gypsum binder on its properties. *Vestnik of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 6, pp. 8–16. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-17-25
6. Drebezgova M.Yu., Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Composite gypsum binder with multicomponent mineral additives of different genesis. *Vestnik of Belgorod*

- генезиса // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 10. С. 27–34.
7. Lesovik V., Drebezgova M., Fediuk R. Fast-curing composites based on multicomponent gypsum binders // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. Vol. 32. No. 9. 04020234. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003313.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33
 8. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Стивенс А.Э., Бегунова Е.В. Структура и свойства гипсовых композиций с минеральными дисперсными добавками // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53>
 9. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С. Повышение эффективности производства сухих строительных смесей: Монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 548 с.
 10. Зозуля П.В. Оптимизация гранулометрического состава и свойств заполнителей и наполнителей для сухих строительных смесей. *Сборник тезисов. 3-я Международная конференция «Сухие строительные смеси для XXI века: Технологии и бизнес»*. 2003. С. 12–13.
 11. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П. Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем негидратационного твердения // *Строительные материалы*. 2010. № 7. С. 22–24.
 12. Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M., Fediuk R., Amran M. Faience waste for the production of wall products // *Materials*. 2021. Vol. 14 (21). DOI: 10.3390/ma14216677
 13. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Белов В.В., Бурьянов А.Ф. Гранулометрический состав как критерий регулирования свойств дисперсных систем // *Строительные материалы*. 2013. № 1. С. 64–65.
 14. Белов В.В., Образцов И.В. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов строительных композитов: Монография. Тверь: ТвГТУ, 2014. 124 с.
 15. Белов В.В., Смирнов М.А. Строительные композиты из оптимизированных минеральных смесей: Монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 112 с.
 16. Дьяченко Е.И., Сушенков А.Н. Роль зернового состава заполнителя в сухих строительных смесях. *Сборник трудов III Международной научно-технической конференции «Современные технологии сухих смесей в строительстве»*. СПб., 2001. С. 83–89.
 17. Хархардин А.Н. Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц // *Известия вузов. Строительство*. 2011. № 5. С. 119–125.
 7. Lesovik V., Drebezgova M., Fediuk R. Fast-curing composites based on multicomponent gypsum binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. Vol. 32. No. 9. 04020234. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003313.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33
 8. Batova M.D., Semenova Yu.A., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Buryanov A.F., Stevens A.E., Begunova E.V. Structure and properties of gypsum compositions with mineral dispersed additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 10, pp. 49–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53>
 9. Zagorodnyuk L.Kh., Lesovik V.S. Povysheniye effektivnosti proizvodstva sukhikh stroitel'nykh smesey: monografiya [Improving the efficiency of production of dry building mixtures: a monograph]. Belgorod. Publishing house of BSTU. 2014. 548 p.
 10. Zozulya P.V. Optimization of particle size distribution and properties of aggregates and fillers for dry building mixtures. *Collection of abstracts. 3rd International Conference “Dry Building Mixes for the 21st Century: Technology and Business”*. 2003, pp. 12–13. (In Russian).
 11. Petropavlovskaya V.B., Belov V.V., Novichenkova T.B., Buryanov A.F., Pustovgar A.P. Optimization of the internal structure of dispersed systems of non-hydration hardening. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 7, pp. 22–24. (In Russian).
 12. Petropavlovskii K., Novichenkova T., Petropavlovskaya V., Sulman M., Fediuk R., Amran M. Faience waste for the production of wall products. *Materials*. 2021. Vol. 14 (21). DOI: 10.3390/ma14216677
 13. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Belov V.V., Buryanov A.F. Granulometric composition as a criterion for regulating the properties of dispersed systems. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 1, pp. 64–65. (In Russian).
 14. Belov V.V., Obratsov I.V. Komp'yuternoye modelirovaniye i optimizirovaniye sostavov stroitel'nykh kompozitov: monografiya [Computer modeling and optimization of compositions of building composites: monograph]. Tver: TVGTU. 2014. 124 p.
 15. Belov V.V. Smirnov M.A. Stroitel'nyye kompozity iz optimizirovannykh mineral'nykh smesey: monografiya [Building composites from optimized mineral mixtures: monograph]. Tver: TVGTU. 2012. 112 p.
 16. Dyachenko E.I., Sushenkov A.N. The role of the grain composition of the aggregate in dry building mixtures. *Proceedings of the 3rd international scientific and technical conference “Modern technologies of dry mixes in construction”*. Saint Petersburg. 2001, pp. 83–89. (In Russian).
 17. Kharhardin A.N. Structural topology of disperse systems of interacting micro- and nanoparticles. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2011. No. 5, pp. 119–125. (In Russian).

С.В. САМЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения, М.Г. БРУЯКО, канд. техн. наук, доцент, Н.В. НОВИКОВ, инженер (аспирант) (novikov177@yandex.ru)

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

Радиационно-защитные свойства ячеистого баритсодержащего бетона

В современной практике для защиты медицинского персонала от воздействия ионизирующих излучений применяются материалы, обладающие высокой плотностью и массой, что пагубно сказывается на технико-экономических показателях возведения подобных конструкций. В данной работе рассмотрена возможность применения ячеистого баритсодержащего бетона в качестве материала конструкции радиационной защиты медицинских помещений. Главной задачей такого подхода является снижение массы защитной конструкции при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик. Методом математического моделирования, исходя из данных об элементных составах и плотностях исследуемых материалов, определены радиационно-защитные характеристики баритсодержащего ячеистого бетона, предназначенного для ослабления интенсивности излучения в соответствии с существующей нормативно-технической документацией. Проведен расчет допустимой кратности ослабления фотонного излучения, возникающего в результате работы аппарата с цифровой обработкой информации, для ограждающих конструкций помещения постоянного пребывания персонала и для смежных помещений. Определены линейные коэффициенты ослабления фотонного излучения, необходимые толщины и масса единицы площади защитных конструкций. Полученные результаты сравнивались с аналогичными показателями конструкций из стандартного бетона, применяемого для защиты рентгенологических кабинетов от ионизирующих излучений. Снижение плотности материала приводит к снижению радиационно-защитных характеристик, однако при увеличении толщины конструкции из рассматриваемого материала можно добиться снижения массы конструкции, необходимой для достижения нормативных радиационно-защитных показателей. Наибольшего эффекта удается достичь при экранировании излучений мощностью 0,02–0,1 МэВ. В этом диапазоне мощностей можно добиться снижения массы ограждающей конструкции на 28–59%. При мощности излучения 0,2–3 МэВ снижение массы составляет 2–8%.

Ключевые слова: радиационно-защитные материалы, баритсодержащий пеногазобетон, облегченные радиационно-защитные конструкции, ионизирующие излучения.

Для цитирования: Самченко С.В., Бруяко М.Г., Новиков Н.В. Радиационно-защитные свойства ячеистого баритсодержащего бетона // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-42-47>

S.V. SAMCHENKO, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of building materials science, M.G. BRUYAKO, Candidate of Science (Engineering), Assistant professor, N.V. NOVIKOV, Engineer (Postgraduate student) (novikov177@yandex.ru) National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Radiation-Protective Properties of Cellular Barite-Containing Concrete

In the modern construction practice, to protect medical personnel from the harmful effects of ionizing radiation, materials with high density and mass are used, which negatively affect the technical and economic performance of the construction. In this paper, the possibility of using cellular barite-containing concrete as a structural material for the radiation protection of the medical premises is considered. The aim of this approach is to reduce the weight of the protective structure while maintaining the required protective characteristics. Using the method of mathematical modeling, based on the elemental compositions and densities of the studied materials, the radiation-protective characteristics of barite-containing cellular concrete, designed to attenuate the radiation intensity in accordance with the existing policies, were determined. The allowable attenuation ratio of photon radiation resulting from the operation of x-ray equipment was calculated for the protective structures. The linear attenuation coefficients of photon radiation, the necessary thicknesses and mass per unit area of protective structures are determined. The obtained results were compared with similar indicators of structures made of standard concrete used for protection X-ray rooms from ionizing radiation. Reducing the density of the material leads to a decrease in radiation-protective characteristics, however, with an increase in the thickness of the structure made of cellular barite-containing concrete, it is possible to achieve a reduction in the mass of the structure necessary to achieve the required radiation-protective characteristics. The greatest effect can be achieved by shielding radiation with an energy range of 0.02–0.1 MeV. In this power range, it is possible to achieve a reduction in the mass of the building structures by 28–59%. At a radiation energy range of 0.2–3 MeV, the reduction in mass is 2–8%.

Keywords: radiation-protective materials, barite containing foam-gas concrete, lightweight radiation-protective structures, ionizing radiation.

For citation: Samchenko S.V., Bruyako M.G., Novikov N.V. Radiation-protective properties of cellular barite-containing concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 42–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-42-47>

В настоящее время в области медицины повсеместное развитие получили технологии, использующие методы лучевой диагностики, что увеличивает радиационную нагрузку на население. В Российской Федерации медицинское облучение занимает второе место по уровню облучения населения после

естественного радиационного фона и составляет около 14% от общей радиационной нагрузки, или 0,56 мЗв [1]. Наибольший вклад в коллективную дозу медицинского облучения вносят компьютерная томография и рентгенография; наибольшие индивидуальные дозы — в интервенционной радиологии,

компьютерной рентгеновской томографии и радионуклидной диагностики [2, 3].

Медицинский персонал, работающий в отделениях больниц, где используется рентгенографическое оборудование, находится в группе риска и может быть подвержен воздействию ионизирующего излучения [4]. Для обеспечения непрерывной и безопасной работы данной категории сотрудников следует обеспечить рабочую среду, соответствующую нормам в области безопасности труда. Добиться этого можно за счет экранирования источников ионизирующего излучения ограждающими конструкциями из современных и эффективных материалов [5].

На сегодняшний день выбор защитных конструкций сравнительно невелик. К основным недостаткам существующих материалов, применяемых при экранировании ионизирующих излучений, относят высокую массу, габариты и стоимость материала [6]. Для защиты от фотонного излучения используются тяжелые материалы с высокими атомными номерами, такие как железо и свинец, а также барит в качестве мелкого и крупного заполнителя в бетоне [7–10].

Современные исследования направлены на разработку экономически выгодных, экологически безопасных и технологичных защитных материалов. Как правило, для защиты от ионизирующих излучений используются материалы высокой плотности [11]. Однако можно использовать материалы с низкой плотностью, увеличив толщину материала для снижения интенсивности излучения [12]. При этом важную роль играет элементный состав материала, поскольку при пониженной плотности возможно добиться требуемых радиационно-защитных характеристик за счет повышенной концентрации химических элементов, способных улучшить защитные показатели материала.

Материалы и методы

К методам испытаний радиационно-защитных материалов относятся натурные испытания, экспериментальная имитация облучения на ускорителях заряженных частиц различной природы и энергии, макро- и микроскопические исследования структуры облученных материалов и испытания их механических свойств, размерной нестабильности, а также математическое моделирование [13].

В представленном исследовании методом математического моделирования были определены радиационно-защитные характеристики баритсодержащего пеногазобетона с целью получения эффективного облегченного материала для защиты от фотонных излучений низких мощностей.

Конструкционные элементы радиационной защиты должны обеспечивать ослабление мощности дозы до показателей, обеспечивающих безопасное пребывание персонала в экранируемом помещении.

Главным нормативным документом, регламентирующим требования к допустимому уровню радиа-

ционного загрязнения рентгенологических кабинетов, является СанПиН 2.6.1.1192.03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований».

Для оценки эффективности радиационной защиты рассчитывается показатель кратности ослабления K мощности поглощенной дозы Φ_0 рентгеновского излучения в воздухе в данной точке в отсутствие защиты до значения допустимой мощности поглощенной дозы Φ_t в воздухе после взаимодействия с конструкцией защиты. Кратность ослабления K рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{\Phi_0}{\Phi_t}. \quad (1)$$

Мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения в воздухе в данной точке в отсутствие защиты Φ_0 рассчитываются по формуле:

$$\Phi_0 = \frac{10^3 \cdot K_R \cdot W \cdot N}{30 \cdot r^2}, \quad (2)$$

где 10^3 – коэффициент перевода мГр в мкГр; K_R – радиационный выход – отношение мощности воздушной кермы в первичном пучке рентгеновского излучения на расстоянии 1 м от фокуса трубки, умноженной на квадрат этого расстояния, к силе анодного тока, мГр·м²/(мА·мин); W – рабочая нагрузка рентгеновского аппарата, мА·мин/нед; N – коэффициент направленности излучения, отн. ед.; r – расстояние от фокуса рентгеновской трубки до точки расчета, м; 30 – значение нормированного времени работы рентгеновского аппарата в неделю при односменной работе персонала группы А (30-часовая рабочая неделя), ч/нед.

Величина радиационного выхода K_R принимается на основании технической документации на конкретное оборудование либо из табл. 1 Приложения 9 СанПиН 2.6.1.1192.03.

Рабочая нагрузка W определяется исходя из области применения оборудования на основании регламентированной длительности проведения рентгенологических исследований при номинальных стандартизированных значениях анодного напряжения и приведена, в зависимости от типа и назначения рентгеновского аппарата, в табл. 4.1 СанПиН 2.6.1.1192.03.

Коэффициент направленности N зависит от направления движения пучка рентгеновского излучения. Для расчета в направлении первичного пучка N считается равным 1; для оборудования, получающего изображение за счет подвижности источника излучения N , равняется 0,1; для направлений, куда падает рассеянное излучение, N равняется 0,05.

Как правило, при проектировании защитных конструкций выделяют участок, работающий под прямым воздействием первичного пучка. Остальная конструкция рассчитывается с учетом ослабления рассеянного излучения.

Таблица 1
Table 1

Химический состав баритсодержащего ячеистого бетона
Elemental composition of barite-containing cellular concrete

Химический состав, %										
Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	Ba	C	N	H	O
14,55	1,22	1,73	25,33	0,56	1,2	2,53	0,05	0,03	2,45	50,35

Расстояние от фокуса рентгеновской трубки до точки расчета r принимается в зависимости от расположения оборудования и габаритов помещения. За точку расчета для конструкций, ограждающих помещения, находящиеся на том же уровне, принимается точка внутренней поверхности конструкции, расположенная перпендикулярно к излучающему оборудованию.

Известно, что ионизирующее излучение ослабляется при прохождении через защитные конструкции при взаимодействии фотонов атомами и электронами с вещества защиты.

Плотность потока фотонов первичного моноэнергетического излучения параллельного пучка, проходящего через вещество толщиной t (см), определяется по формуле (3) [14]:

$$\varphi_t = \varphi_0 e^{(-\mu t)}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент линейного ослабления фотонного излучения.

Из уравнения (3) получаем функцию для определения толщины защитной конструкции:

$$t = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{\varphi_0}{\varphi_t} \right) = \frac{\ln(K)}{\mu}. \quad (4)$$

Входящий в эти формулы коэффициент линейного ослабления μ зависит от энергии излучения и со-

Таблица 2
Table 2

Химический состав обычного бетона
плотностью 2350 кг/м³ [21]
Elemental composition of concrete
with a density of 2350 kg/m³ [21]

Химический состав, %					
H	O	Al	Si	Fe	Ca
0,35	54,25	4,68	32,93	1,96	5,82

става материала ограждающей конструкции. Установить величину этого показателя можно как экспериментальным путем, так и при помощи аналитического расчета [15, 16].

Для аналитического определения линейных коэффициентов ослабления μ вводится массовый коэффициент ослабления μ_m , через соотношение (5) [17]:

$$\mu = \mu_m \rho, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала защитной конструкции.

Эта формула применима для простого вещества. Для определения массового коэффициента ослабления сложного вещества, состоящего из нескольких простых веществ, производится расчет по формуле (6):

Таблица 3
Table 3

Массовые коэффициенты ослабления химических элементов μ_m
Mass attenuation coefficients of chemical elements μ_m

Энергия излучения, МэВ	H	C	N	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ba
0,02	0,369	0,432	0,602	0,843	2,7	3,393	4,374	6,592	12,9	22,64	29,03
0,03	0,357	0,254	0,304	0,373	0,919	1,109	1,413	2,085	3,968	7,201	9,735
0,04	0,346	0,209	0,228	0,257	0,483	0,562	0,69	0,978	1,804	3,59	24,56
0,05	0,335	0,187	0,197	0,212	0,327	0,366	0,435	0,58	1,012	1,93	13,73
0,06	0,326	0,175	0,181	0,19	0,255	0,277	0,319	0,404	0,651	1,197	8,507
0,08	0,308	0,161	0,164	0,167	0,194	0,202	0,223	0,257	0,361	0,592	3,947
0,1	0,294	0,151	0,153	0,155	0,168	0,17	0,183	0,201	0,254	0,368	2,179
0,2	0,243	0,123	0,123	0,123	0,124	0,122	0,127	0,13	0,137	0,144	0,401
0,4	0,189	0,095	0,095	0,096	0,095	0,093	0,096	0,097	0,098	0,094	0,125
0,6	0,16	0,08	0,08	0,081	0,08	0,078	0,081	0,081	0,081	0,077	0,083
0,8	0,14	0,071	0,071	0,071	0,07	0,068	0,071	0,071	0,071	0,067	0,067
1	0,126	0,064	0,064	0,064	0,063	0,061	0,062	0,064	0,064	0,06	0,058
1,5	0,103	0,052	0,052	0,052	0,051	0,05	0,052	0,052	0,052	0,049	0,046
2	0,087	0,044	0,044	0,044	0,044	0,043	0,045	0,045	0,045	0,042	0,041
3	0,069	0,036	0,036	0,036	0,036	0,035	0,037	0,037	0,038	0,036	0,037

Таблица 4
Table 4

Результаты расчетов линейных коэффициентов ослабления μ ,
требуемой толщины экранирующей конструкции t и массы 1 м^2 экранирующей конструкции m
The results of calculations of the linear attenuation coefficients μ ,
the required thickness of the shielding structure t and the mass of 1 м^2 of the shielding structure m

Энергия излучения, МэВ	Ячеистый баритсодержащий бетон, $\rho=1350 \text{ кг/м}^3$				Бетон обычный, $\rho=2350 \text{ кг/м}^3$			
	Линейный коэффициент ослабления μ , см^{-1}	Требуемая толщина экранирующей конструкции		Масса 1 м^2 экранирующей конструкции m , кг	Линейный коэффициент ослабления μ , см^{-1}	Требуемая толщина экранирующей конструкции		Масса 1 м^2 экранирующей конструкции m , кг
		t_1 , см	t_2 , см			t_1 , см	t_2 , см	
0,02	7,558	0,9	1,1	15,33	7,642	0,9	1,1	26,39
0,03	2,46	2,8	3,5	47,1	2,569	2,7	3,3	78,51
0,04	1,89	3,7	4,5	61,3	1,338	5,2	6,4	150,7
0,05	1,119	6,2	7,7	103,56	0,878	7,9	9,8	229,77
0,06	0,757	9,2	11,3	153,04	0,667	10,4	12,9	302,45
0,08	0,449	15,4	19,1	258,05	0,487	14,2	17,6	413,78
0,1	0,328	21,1	26,1	352,75	0,412	16,8	20,8	489,46
0,2	0,186	37,2	46,1	622,36	0,297	23,4	28,9	679,44
0,4	0,134	51,8	64,1	865,18	0,226	30,7	38	893,78
0,6	0,112	62,1	76,9	1037,81	0,19	36,5	45,2	1062,67
0,8	0,098	71	87,9	1186,53	0,166	41,7	51,6	1212,91
1	0,087	79,3	98,2	1325,16	0,148	46,7	57,8	1358,12
1,5	0,071	97,4	120,6	1627,49	0,121	57,1	70,7	1660,82
2	0,062	112,6	139,4	1882,47	0,105	66,1	81,8	1922,51
3	0,05	137,6	170,3	2298,98	0,085	81,1	100,4	2360,18

$$\mu_m = \sum_i p_i \mu_{mi}, \quad (6)$$

где p_i – весовая доля i -го химического элемента, μ_{mi} – массовый коэффициент ослабления i -го химического элемента.

Массовые коэффициенты ослабления играют важную роль при аналитической оценке радиационно-защитных свойств материала [18–20]. За счет высокой концентрации в составе материала элементов, обладающих высоким массовым коэффициентом ослабления, можно добиться высоких радиационно-защитных характеристик изделия даже при пониженной плотности.

Результаты исследования

При расчете требуемой кратности ослабления K принимаем характеристики для рентгенодиагностического аппарата с цифровой обработкой информации с анодным напряжением 100 кВ, согласно СанПиН 2.6.1.1192.03.

Расчет проводим для ограждающих конструкций помещения постоянного пребывания персонала и для смежных помещений при расстоянии 1,5 м от оборудования до стены рентгенологического кабинета:

$$\begin{aligned} W &= 1000 \text{ мА} \cdot \text{мин} / \text{нед}; \\ K_R &= 9 \text{ мГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{мА} \cdot \text{мин}); \\ N &= 0,1; \\ r &= 1,5 \text{ м}. \end{aligned}$$

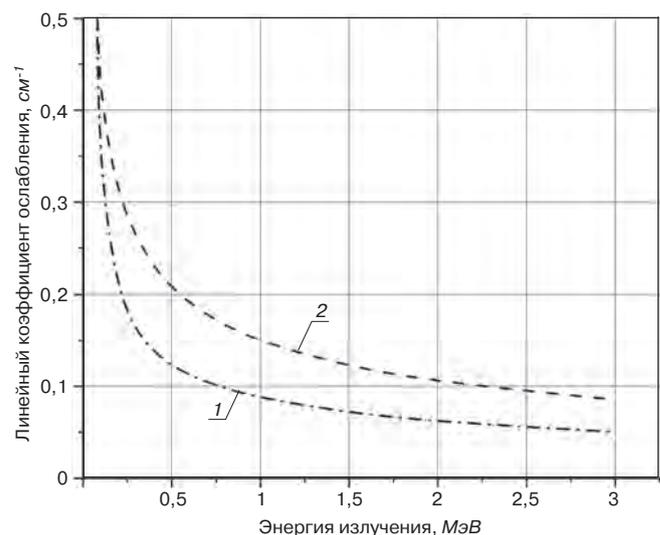


Рис. 1. Зависимость величины коэффициента линейного ослабления исследуемых материалов от энергии излучения: 1 – баритсодержащий бетон, $\rho=1350 \text{ кг/м}^3$; 2 – бетон обычный, $\rho=2350 \text{ кг/м}^3$

Fig. 1. Dependence of the linear attenuation coefficient value of the materials under study on the radiation energy: 1 – barite-containing concrete, $\rho=1350 \text{ kg/m}^3$; 2 – ordinary concrete, $\rho=2350 \text{ kg/m}^3$

По формуле (2) получаем значение мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения в воздухе в данной точке в отсутствие защиты, $\Phi_0=13333 \text{ мкГр/ч}$.

Допустимая мощность поглощенной дозы в воздухе Φ_x принята по табл. 4.2 СанПиН 2.6.1.1192.03:

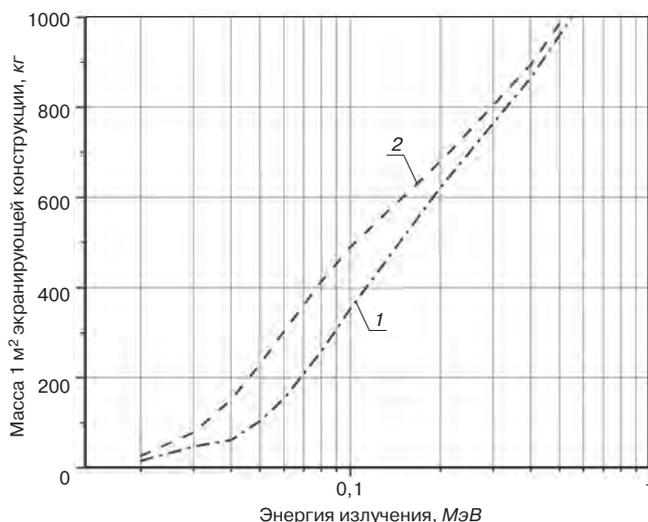


Рис. 2. Зависимость массы единицы площади ограждающей конструкции от энергии излучения: 1 – баритсодержащий бетон, $\rho=1350 \text{ кг/м}^3$; 2 – бетон обычный, $\rho=2350 \text{ кг/м}^3$
Fig. 2. Dependence of the mass per unit area of the protective structures on the radiation energy: 1 – barite-containing concrete, $\rho=1350 \text{ kg/m}^3$; 2 – ordinary concrete, $\rho=2350 \text{ kg/m}^3$

$\Phi_{1t} = 13 \text{ мкГр/ч}$, для помещений постоянного пребывания персонала;

$\Phi_{2t} = 2,5 \text{ мкГр/ч}$, для смежных помещений.

Расчет по формуле (1) дает следующие значения требуемой кратности ослабления:

$K_1=1026$, $K_2=5333$.

Для определения линейных коэффициентов ослабления фотонного излучения и требуемой толщины защитной конструкции из ячеистого баритсодержащего бетона определен его химический состав (табл. 1). Для установления эффективности облегчения защитной конструкции вычислена масса 1 м^2 защитной конструкции, при толщине, необходимой для обеспечения достаточного ослабления мощности дозы. Эти характеристики сравнивались с аналогичными показателями стандартного бетона, используемого для защиты от ионизирующих излучений, химический состав которого взят из [21] (табл. 2).

Значения массовых коэффициентов ослабления взяты из справочных данных [22] (табл. 3). Линейные коэффициенты ослабления определены по формуле (5), минимальная необходимая толщина защитной конструкции рассчитана по формуле (4). Результаты расчетов приведены в табл. 4.

На рис. 1 представлен график изменения радиационно-защитных свойств материала в зависимости от энергии излучения. На рис. 2 представлен график изменения массы ограждающей конструкции, необходимой для обеспечения допустимых радиационных условий.

Заключение и обсуждение

По полученным данным можно сделать вывод, что снижение плотности материала приводит к снижению радиационно-защитных характеристик, однако при увеличении толщины конструкции из рас-

сматриваемого материала можно добиться снижения массы конструкции, необходимой для достижения нормативных радиационных показателей. Наибольшего эффекта удается достичь при экранировании излучений мощностью $0,02-0,1 \text{ МэВ}$. В этом диапазоне мощностей можно добиться снижения массы ограждающей конструкции на $28-59\%$. При мощности излучения $0,2-3 \text{ МэВ}$ снижение массы составляет $2-8\%$.

Список литературы / References

1. Онищенко Г.Г., Романович И.К. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7. № 4. С. 5–22.
1. Onishchenko G.G., Romanovich I.K. The main directions of ensuring the radiation safety of the population of the Russian Federation at the present stage *Radiatsionnaya gygiena*. 2014. Vol. 7. No. 4, pp. 5–22. (In Russian).
2. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., Кальницкий С.А., Репин В.С., Сарычева С.С., Чипига Л.А. Современные уровни медицинского облучения в России // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8. № 3. С. 67–79.
2. Balonov M.I., Golikov V.Yu., Zvonova I.A., Kalnitsky S.A., Repin V.S., Sarycheva S.S., Chipiga L.A. Modern levels of medical exposure in Russia. *Radiatsionnaya gygiena*. 2015. Vol. 8. No. 3, pp. 67–79. (In Russian).
3. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А., Чипига Л.А., Шацкий И.Г., Репин Л.В., Библин А.М. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Ч. 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12. № 1. С. 6–24. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24>
3. Onishchenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovatov A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., Chipiga L.A., Shatsky I.G., Repin L.V., Biblin A.M. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of x-ray diagnostics and doses from medical exposure. *Radiatsionnaya gygiena*. 2019. Vol. 12. No. 1, pp. 6–24. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24>
4. Yıldız A., Köse E., Demirtaş Ö.C. Analysis of precautions taken for protection from X-rays in a hospital in Gaziantep in the context of workplace health and safety. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2022. Vol. 15. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.08.004>
5. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Расчетно-экспери-

- ментальное исследование гомогенных защит от гамма-излучения // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2015. № 3 (77). С. 17–24.
5. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Khomyakov A.P., Russkikh I.M., Seleznev E.N. Computational and experimental study of homogeneous protection against gamma radiation. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2015. No. 3 (77), pp. 17–24. (In Russian).
 6. Abu Al Roos N.J., Amin N.A.B., Zainon R. Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. *Radiation Physics and Chemistry*. 2019. Vol. 165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108439>
 7. Ташлыков О.Л., Шеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2015. № 4. С. 36–42. DOI: 10.26583/npe.2015.4.04
 7. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Lukyanenko V.Yu., Mikhailova A.F., Russkikh I.M., Seleznev E.N., Kozlov A.V. Optimization of the composition of radiation protection. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 2015. No. 4, pp. 36–42. (In Russian). DOI: 10.26583/npe.2015.4.04
 8. Daungwilailuk T., Yenchai C., Rungjaroenkiti W., Pheinsusom P., Panwisawas C., Pansuk W. Use of barite concrete for radiation shielding against gamma-rays and neutrons. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126838>
 9. Akkurt I., Basyigit C., Kilincarslan S., Mavi B. The shielding of γ -rays by concretes produced with barite. *Progress in Nuclear Energy*. 2005. Vol. 46. No. 1, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2004.09.015>
 10. Saidani K., Ajam L., Ouedzou M. B. Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 95, pp. 287–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.140>
 11. Luković J., Biljana B., Bučevac D., Prekajski M., Pantić J., Bašćarević Z., Matović B. Synthesis and characterization of tungsten carbide fine powders. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. No. 1. Part B, pp. 1271–1277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.09.057>
 12. Duran S.U., Küçüköğmeroğlu B., Çiriş A., Ersoy H. Gamma-ray absorbing characteristic of obsidian rocks as a potential material for radiation protection. *Radiation Physics and Chemistry*. 2022. Vol. 199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110309>
 13. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Федоренко А.В., Шейченко М.С., Вишневецкая Я.Ю. Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 4. С. 20–25. DOI: 10.12737/article_58e24bcd42faa5.10006763
 13. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Fedorenko A.V., Sheichenko M.S., Vishnevskaya Ya.Yu. Modern trends in the development of radiation-protective materials science. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 4, pp. 20–25. (In Russian) DOI: 10.12737/article_58e24bcd42faa5.10006763
 14. Костылев В.А., Наркевич Б.Я. Медицинская физика. М.: Медицина, 2008. 464 с.
 14. Kostylev V.A., Narkevich B.Ya. *Meditsinskaya fizika [Medical physics]*. Moscow: Medicine. 2008. 464 p.
 15. Reda S.M., Saleh H.M. Calculation of the gamma radiation shielding efficiency of cement-bitumen portable container using MCNPX code. 2021. *Progress in Nuclear Energy*. Vol. 142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104012>
 16. Cherkashina N., Gavrish V., Chayka T. Experiment – calculated investigation of composite materials for protection against radiation. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 11. Part 1, pp. 554–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.028>
 17. Şensoy A., Gökçe H. Simulation and optimization of gamma-ray linear attenuation coefficients of barite concrete shields. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119218>
 18. Lakshminarayana G., Kumar A., Dong M., Sayyed M., Long N.V., Mahdi M. Exploration of gamma radiation shielding features for titanate bismuth borotellurite glasses using relevant software program and Monte Carlo simulation code. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 481, pp. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.10.027>
 19. Baltas H., Sirin M., Celik A., Ustabas I., El-Khayatt A. Radiation shielding properties of mortars with minerals and ores additives. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 97, pp. 268–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.006>
 20. Sayyed M., Askin A., Zaid M., Olukotun S., Khandaker M.U., Tishkevich D.I., Bradley D. Radiation shielding and mechanical properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O--TiO}_2\text{--ZnO--TeO}_2$ glass system. *Radiation Physics and Chemistry*. 2021. Vol. 186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109556>
 21. Комаровский А.Н. Строительство ядерных установок. М.: Атомиздат, 1969. 503 с.
 21. Komarovskiy A.N. *Stroitel'stvo yadernykh ustanovok [Construction of nuclear installations]*. Moscow: Atomizdat. 1969. 503 p.
 22. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 414 с.
 22. Nemets O.F., Gofman Yu.V. *Spravochnik po yadernoi fizike [Handbook of nuclear physics]*. Kyiv: Naukova Dumka. 1975. 414 p.

М.А. ГОНЧАРОВА¹, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru),
Р.Э. АГАМОВ¹, инженер (smidt48@mail@ru), А.Г. ЗАЕВА¹, инженер (nastenkast08@mail.ru),
Г.М. БУТУЗОВ¹, инженер (smidt48@mail@ru); П.В. МОНАСТЫРЕВ², д-р техн. наук (monastyrev68@mail.ru)

¹ Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

² Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5)

Механизмы формирования структуры и свойств прессованных мелкозернистых бетонов

Подробно рассмотрены возможности оптимизации технологических и рецептурных факторов и внешних воздействий в условиях прессования изделий из мелкозернистого бетона. Показано, что особую актуальность приобретают задачи повышения качества этих изделий. Установлено, что влажностная усадка является важнейшим и проблемным свойством современных бетонов модифицированной структуры, снижающим их качество. В статье показано, что оптимальные строительно-технические свойства получены в диапазоне В/Т-отношений, от 0,12 до 0,16, что характеризует кинетику твердения мелкозернистых бетонов, отпрессованных до одной и той же плотности. Изучено влияние выбранных компонентов и технологических факторов на процессы раннего структурообразования цементных систем (начиная с момента смешивания компонентов), на баланс внутренних (пленочных расклинивающих и капиллярных стягивающих) сил в системе в широком диапазоне водоцементных отношений. Полученные результаты дают необходимые ориентиры для специалистов и потребителей прессованных изделий.

Ключевые слова: мелкозернистые бетоны, прессование, системы твердения строительных композитов, структурообразование, водотвердое отношение, влажность, гранулометрия, прочность.

Для цитирования: Гончарова М.А., Агамов Р.Э., Заева А.Г., Бутузov Г.М., Монастырев П.В. Механизмы формирования структуры и свойств прессованных мелкозернистых бетонов // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 48–53.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-48-53>

M.A. GONCHAROVA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru), R.E. AGAMOV¹, Engineer (smidt48@mail@ru),

A.G. ZAEVA¹, Engineer (nastenkast08@mail.ru), G.M. BUTUZOV¹, Engineer (smidt48@mail@ru);

P.V. MONASTYREV², Doctor of Sciences (monastyrev68@mail.ru)

¹ Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya Street, Building B, Lipetsk, 398005, Russian Federation)

² Tambov State Technical University (106/5 Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russian Federation)

Mechanisms for the Formation of the Structure and Properties of Pressed Fine-Grained Concretes

The possibilities of optimizing technological and prescription factors and external influences under the conditions of pressing products from fine-grained concrete are considered in detail. It is shown that the tasks of improving the quality of these products are of particular relevance. It is established that moisture shrinkage is the most important and problematic property of modern concrete of modified structure, reducing their quality. The article shows that optimal construction and technical properties are obtained in the range of V/T ratios from 0.12 to 0.16, which characterizes the kinetics of hardening of fine-grained concrete pressed to the same density. The influence of the selected components and technological factors on the processes of early structure formation of cement systems (starting from the moment of mixing the components) on the balance of internal (film wedging and capillary tightening) forces in the system in a wide range of water-cement ratios was studied. The results obtained provide the necessary guidelines for specialists and consumers of pressed products.

Keywords: fine-grained concrete, pressing, hardening systems of building composites, structure formation, water-solid ratio, humidity, granulometry, strength.

For citation: Goncharova M.A., Agamov R.E., Zueva A.G., Butuzov G.M., Monastyrev P.V. Mechanisms for the formation of the structure and properties of pressed fine-grained concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 48–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-48-53>

На современном этапе развития стройиндустрии интерес к прессованным изделиям из мелкозернистого бетона постоянно увеличивается. При этом расширяется область применения изделий из высококачественных бетонных смесей. Особую актуальность приобретают задачи повышения качества таких изделий. Проблема качества должна рассматриваться системно и комплексно, т. е. включать рецептурные, технологические и другие параметры, важные с точки зрения структурообразования и формирования свойств изделий.

Программа исследований, касающихся раннего структурообразования, не может быть успешно решена без привлечения фундаментальных научных положений физической и коллоидной химии, меха-

ники дисперсных систем, из которых определяющим для многих технологических вопросов является положение об избыточной поверхностной энергии, проявляемой на межфазных границах [1, 2, 3].

В системах твердения строительных композитов, содержащих газовую фазу, соотношение поверхностных энергий влияет на силу связи воды с частицами твердой фазы и на ее распределение в дисперсной системе. При малых количествах жидкая фаза полностью распределяется в виде тонких жесткоструктурированных пленок на поверхности твердых частиц, создавая расклинивающий эффект (по Ребиндеру) [3].

По мере увеличения дозировки воды и утолщения пленок этот эффект усиливается и появляются условия для локализации определенного количества воды

в межчастичных стыках с образованием на границе с газовой фазой вогнутых в сторону жидкости менисков. Такую воду принято считать капиллярной.

Вогнутые мениски являются признаком пониженного атмосферного давления, которое стремится сблизить частицы твердой фазы. В результате в противовес расклинивающему эффекту возникает стягивающий эффект. По мере повышения влажности формовочной смеси количество межчастичных стыков, аккумулирующих воду, возрастает. При этом также возрастает капиллярный эффект. При степени заполнения межзерновых пустот на 24% и более от их объема отдельные влажностные «манжеты» (по Лыкову) объединяются в связную систему капилляров. В этот момент стягивающий капиллярный эффект становится преобладающим [4–7].

Факторы влажности, дисперсности, свойства поверхности частиц твердой фазы существенно влияют и на процессы самоорганизации структуры дисперсно-зернистых систем твердения. При первичном увлажнении формируется структура из мелких агрегатов – кластеров. Вода, адсорбируясь на активных центрах как внутри кластерных образований, так и между ними, образует водные стыки между частицами и агрегатами. Наблюдаемое снижение плотности системы происходит в результате действия механизма обводнения и эффекта расклинивания.

С повышением водоцементного отношения и за счет перехода в область нарастающего преобладания капиллярных сил агрегаты уплотняются. При дальнейшем увлажнении увеличение интегральной плотности системы происходит за счет уменьшения межагрегатного расстояния, на котором действие капиллярных сил становится преобладающим [8, 9].

Экспериментальная часть

Даже при достижении максимально возможной интегральной плотности самоорганизующихся систем четко просматривается наличие локальной неоднородности системы. Дальнейшее повышение плотности возможно путем оптимизации воздействия технологических и рецептурных факторов, а также изменения баланса внутренних сил за счет внешних воздействий. Так, оптимизация баланса внутренних и внешних сил при вибропрессовании позволила на 20 % снизить пустотность систем твердения, повысить прочность в 1,5 раза и снизить энергозатраты на уплотнение в пять раз [10–15].

Рассмотрим более подробно возможности оптимизации факторов и внешних воздействий в условиях прессования. В бетонных смесях сложность межфазных взаимодействий усугубляется широким диапазоном размеров частиц дисперсной фазы, одновременным присутствием жидкой и газовой составляющих системы. Можно предположить, что количество жидкой фазы и степень дисперсности минеральной твердой фазы изначально определяют структуру бетона. Сочетание этих факторов в прессованных бетонах (в диапазоне малых значений водоцементных отно-

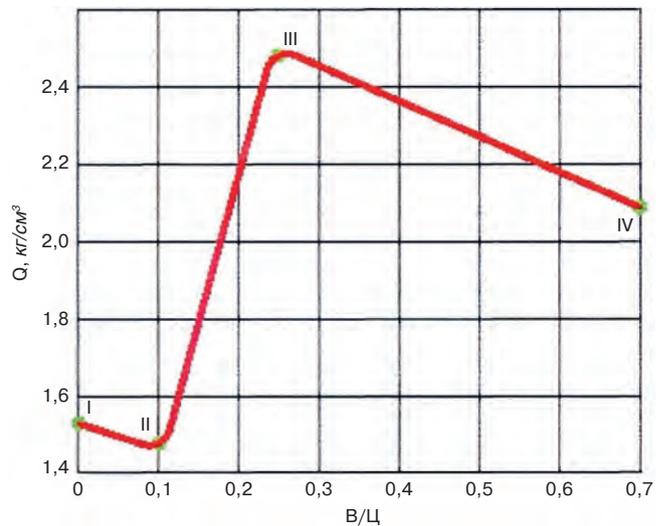


Рис. 1. Характер зависимости плотности цементно-водной дисперсии от количества жидкой фазы

Fig. 1. The nature of the dependence of the density of cement-water dispersion on the amount of liquid phase

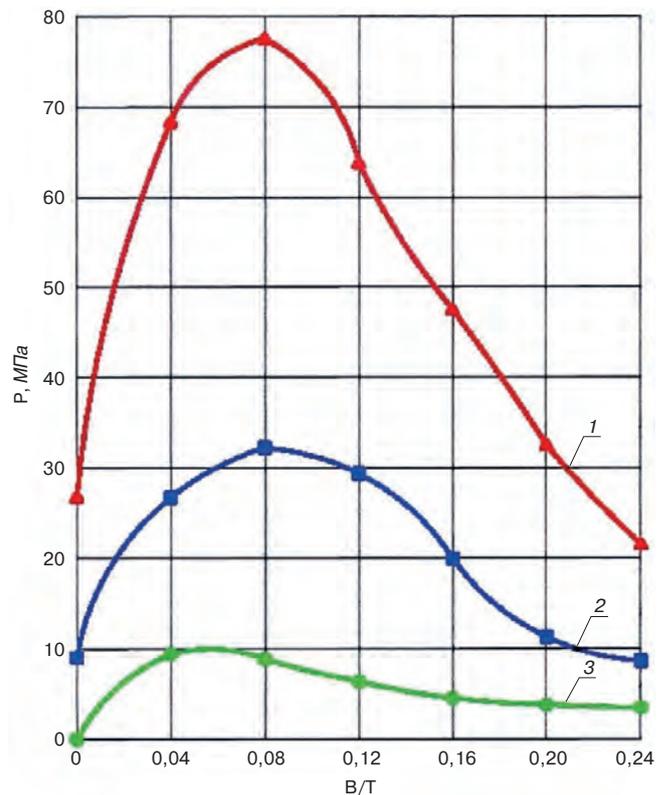


Рис. 2. Изменение давления прессования (P) в зависимости от влажности песчаных образцов: 1 – межзерновая пористость 33%; 2 – 38%; 3 – 44%

Fig. 2. Change in pressing pressure (P) depending on the moisture content of sand samples: 1 – intergranular porosity 33%; 2 – 38%; 3 – 44%

шений, меньше $B/C = 0,22$) реализуется сложнее, чем это учитывается основным законом прочности.

Проявление внутренних сил в системах твердения получило подтверждение посредством кривой плотности цементно-водной дисперсии (рис. 1) [16, 17].

Экспериментально установлено, что разуплотнение цементно-водной дисперсии на участке I–II об-

условлено преобладающим действием водно-пленочных расклинивающих сил. На участке II–III происходит самоуплотнение за счет преобладающего действия отрицательного внутрикапиллярного давления. На участке III–IV снижение плотности происходит по законам устойчивости постепенно теряющих концентрацию твердой фазы суспензий [8].

В практическом аспекте диапазон влажностей, соответствующий участку I–II–III на кривой плотности, интересен тем, что он включает в себя весь спектр формовочных влажностей, характерных для трех способов пресс-формования различных изделий: сухого, полусухого и пластического [8, 9].

Для мелкозернистых бетонов на цементной основе производственные формовочные влажности находятся, как правило, в диапазоне от 6 до 8% ($V/C=0,07-0,08$). Но такая влажность не может рассматриваться как оптимальная. Попробуем подтвердить этот вывод экспериментально.

На рис. 2 показано, как изменялось давление прессования, необходимое для обеспечения заданной степени плотности структуры модельных систем в зависимости от количества в них воды и от степени дисперсности твердых частиц. В качестве модельных были использованы прессованные бесцементные системы (кварцевый песок – вода) для усиления объективности полученных результатов, касающихся оптимизации гранулометрии смесей, в которых силы химической природы исключены.

В результате получили параболические кривые, связывающие величину давления прессования с влажностным фактором. Практически максимальное давление соответствовало тем значениям влажности, при которых в максимальной степени был реализован пленочный расклинивающий эффект.

Высказанным представлениям о конкурирующем взаимодействии пленочных и капиллярных сил полностью соответствуют и результаты экспериментальных исследований, приведенных на рис. 3 и отражающих зависимость от влажности плотности отформованной при постоянном давлении систем твердения.

Самые низкие показатели плотности соответствуют влажности, находящейся в пределах 5–7%, т.е. максимальному проявлению пленочных расклинивающих сил. Как с повышением, так и с понижением влажности дисперсии плотность системы возрастает, но причины этого явления различны.

При низких значениях влажности повышение плотности связано с более тонкими пленками воды. При этом, чем выше дисперсность частиц твердой фазы, тем ниже плотность, так как суммарная толщина пленок воды в межзерновых контактах при этом увеличивается в связи с возрастающим по мере измельчения частиц их удельным (относительно массы) содержанием.

С возрастанием же влажности сверх отмеченных 5–7% сравнительно высокая плотность формируется в более тонкодисперсных системах в связи с более

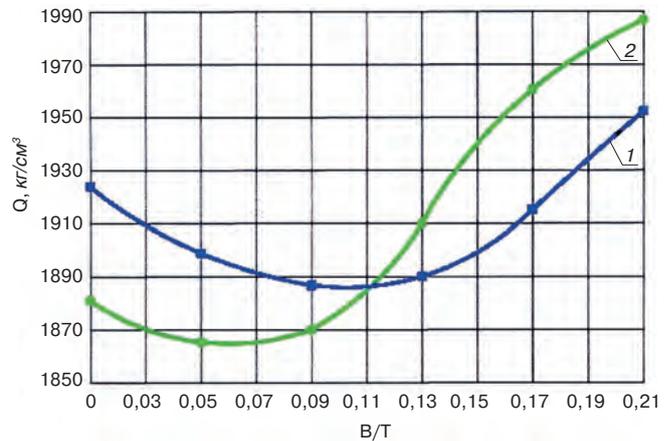


Рис. 3. Зависимость плотности прессованных образцов от В/Т-отношения и дисперсности песка при постоянном прессовом давлении $P=50$ МПа: 1 – $S_{уд}=100$ м²/кг; 2 – $S_{уд}=400$ м²/кг

Fig. 3. Dependence of the density of pressed samples on the W/T ratio and fineness of sand at a constant pressing pressure $P=50$ MPa: 1 – $S_{sp}=100$ m²/kg; 2 – $S_{sp}=400$ m²/kg

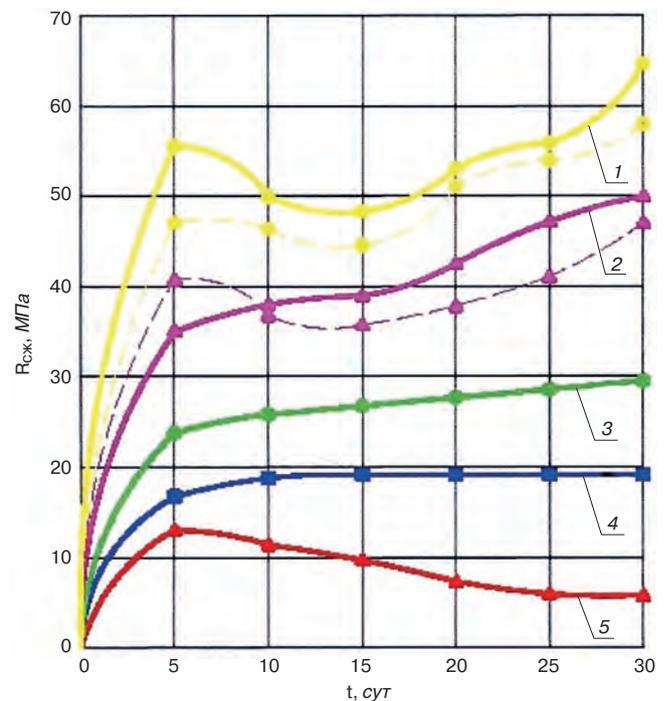


Рис. 4. Динамика изменения прочностных показателей: 1 – $V/T=0,16$; 2 – $V/T=0,14$; 3 – $V/T=0,12$; 4 – $V/T=0,1$; 5 – $V/T=0,08$

Fig. 4. Dynamics of change in strength indicators: 1 – $V/T=0,16$; 2 – $V/T=0,14$; 3 – $V/T=0,12$; 4 – $V/T=0,1$; 5 – $V/T=0,08$

Примечание*

Сплошные линии соответствуют относительной влажности среды 100%, пунктирные – влажности 70%

Note*

Solid lines correspond to a relative humidity of 100%, dotted lines correspond to a humidity of 70%

высоким для них капиллярным потенциалом (в соответствии с формулой Лапласа отрицательное капиллярное давление по абсолютной величине обратно пропорционально размерам частиц).

Таким образом, влияние внутренних сил дисперсной системы значительно влияет на ее раннюю структуру, а также на механизм формирования под давлением систем твердения.

В дальнейших исследованиях выявим, насколько значимы характеристики ранней структуры для последующих процессов структурообразования и свойств конечного продукта.

Постараемся максимально приблизиться к реальным условиям производства, рассматривая поставленную задачу применительно к условиям твердения, т. е. продолжительность, температурный и влажностный факторы. Особое внимание уделили влажностному режиму в связи с тем, что сегодня на многих производствах в качестве теплоносителя используется не традиционный насыщенный водяной пар, а различного рода влагоненасыщенные теплоносители: паровоздушные смеси, продукты сгорания природного газа и т. д. [18, 19].

На рис. 4 представлены результаты, которые при одинаковой влажности характеризовали кинетику твердения цементных образцов, отпрессованных до одной и той же плотности. Сравнение результатов проводили при 100 и 70% относительной влажности среды твердения (характерных для промышленного производства влажностных условий). Были выбраны стандартные условия твердения для того, чтобы наиболее объективно и точно уловить влияние исследуемых факторов.

Отметим, что при относительной влажности среды 100 % все образцы в процессе выдерживания на протяжении 28 сут повысили свою влажность, за исключением первых суток. Изменение влажности в первые сутки чутко отреагировало на исходные значения В/Ц-отношения: при значениях В/Ц от 0,16 до 0,08 влажность понизилась. При этом понижение влажности в образцах с В/Ц=0,04–0,18 происходило строго пропорционально степени начального заполнения межзерновых пор водой. Более глубокий и всесторонний анализ показал, что в первые сутки основная часть воды уходит на «иммобилизацию» ее частицами цемента, часть воды испарилась из-за повышения температуры образцов за счет теплоты гидратации цемента, количество которой было пропорционально степени гидратации.

При влажности среды 70 % количество испаряемой в первые сутки воды во всех образцах увеличилось по сравнению с влагонасыщенной средой. Но при дальнейшем выдерживании образцы повели себя по-разному. При высоких значениях В/Ц-отношения (0,16–0,12) установилась влажность, равновесная с окружающей средой, и с течением времени она не изменялась.

Список литературы

1. Дерягин В.В., Чураев А.В., Овчаренко Ф.Д. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 288 с.
2. Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Тараканов О.В., Санягина Я.А., Ерофеева И.В., Суздальцев О.В. Декоративно-отделочные порошково-активированные бетоны с зернистой фактурой поверхности // *Строительные материалы*. 2022. № 10. С. 25–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-25-40>

В образцах с В/Ц меньше 0,12 даже при влагоненасыщенной среде прирост влаги происходил за счет хемосорбции, о чем свидетельствовало повышение степени гидратации портландцемента.

При этом самым значимым фактором оказалось исходное В/Ц-отношение. Именно пропорционально ему распределились конечные значения прочности и степени гидратации цемента в образцах.

Результаты и их обсуждение

Показатели прочности соотносятся между собой в том же порядке, что и показатели степени гидратации. При этом образцы, отформованные при неблагоприятном для раннего структурообразования В/Ц=0,06, лишь в первые сутки показали очень незначительную прочность, которая на протяжении последующего времени твердения практически не увеличилась. В то же время образцы с В/Ц, равным 0,14 и 0,16, уже через пять дней показали прочность 35 и 55 МПа соответственно, которая в дальнейшем продолжала прирастать.

Такие показатели прочности были обеспечены комплексом факторов, в том числе повышенной плотностью образцов, наличием в межзерновом пространстве объемной воды и, как следствие, достижением высокой степени гидратации цемента.

Столь значительная разница в степени заполнения пор водой существенным образом повлияла на структуру цементного камня. При относительно низком содержании воды наблюдался преимущественно эпитаксиальный рост новообразований сначала внутреннего, а затем внешнего «ритма» (по Тейлору). Взаимное срастание частиц новообразований происходило лишь по отдельным точкам.

При содержании воды в порах, близком к предельному, структура внешнего «ритма» получилась весьма развитой, новообразования преимущественно игольчатого типа заполнили практически весь межзерновой объем и имели многочисленные контакты срастания. Это и обеспечило высокие показатели прочности.

Таким образом, оптимизация влажностного и технологического режимов в прессованных изделиях из мелкозернистых бетонов до предельно допустимых (по условиям технологии) значений является мощным фактором повышения их качества. При этом тепловая обработка изделий может быть исключена из технологического цикла.

References

1. Deryagin V.V., Churaev A.V., Ovcharenko F.D. *Voda v dispersnykh sistemakh* [Water in dispersed systems]. Moscow: Khimiya. 1989. 288 p.
2. Erofeev V.T., Maksimova I.N., Tarakanov O.V., Sanyagina Ya.A., Erofeeva I.V., Suzdaltsev O.V. *Decorative and finishing powder-activated concretes with a granular surface texture. Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 10, pp. 25–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-25-40>

3. Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Данилов В.Е., Дроздук Т.А., Малыгина М.А. Модификационные превращения сапонитсодержащего материала при механическом помоле // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-54-59>
4. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Сравнительный анализ влияния наномодифицирования и микродисперсного армирования на процесс и параметры разрушения высокопрочных легких бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 11–15. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-11-15>
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-754-11-4-10>
6. Грызлов В.С., Завьялова Д.В. Отсев дробления шлакового щебня как эффективный компонент бетона // *Строительные материалы*. 2018. № 5. С. 40–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-40-43>
7. Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Мраев А.В. Сталеплавильные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
8. Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Пачин А.Р. Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>
9. Аль-Суррайви Х.Г.Х., Гончарова М.А., Заева А.Г. Синтез композитов на основе местного сырья при воздействии агрессивной среды // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74>
10. Гончарова М.А., Комаричев А.В., Карасева О.В. Композиционные инъекционные материалы с двухстадийной магнитной обработкой систем твердения // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 6 (74). С. 114–120.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610509 РФ. *Программа для подбора состава бездобавочного легкого бетона*. Гончарова М.А., Юдина А.О., Дергунова Е.С. Заявл. 27.12.2022. Оpubл. 11.01.2023
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618934 РФ. *Программа для расчета составов бетонов различной структуры*. Гончарова М.А., Мякиев А.Х., Дергунова Е.С. Заявл. 25.04.2023. Оpubл. 03.05.2023.
13. Goncharova M.A., Krokhotin V.V., Ivashkin A.N. The influence of fiber reinforcement on the properties of the selfcompacting concrete mix and concrete // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. P. 112–117. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.112
3. Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Danilov V.E., Drozdyuk T.A., Malygina M.A. Modification transformations of saponite-containing material during mechanical grinding. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 7, pp. 54–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-54-59>
4. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Comparative analysis of influence of nanomodification and micro-dispersed reinforcement on the process and parameters of destruction of high-strength lightweight concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 11–15. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-11-15>.
5. Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for producing high-strength concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 4–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-754-11-4-10>
6. Gryzlov V.S., Zavalova D.V. Screenings of crushing of broken slag as an efficient component of concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 5, pp. 40–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-40-43>
7. Agamov R.E., Goncharova M.A., Mraev A.V. Steelmaking slags as an effective raw material in road construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 56–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
8. Agamov R.E., Goncharova M.A., Pachin A.R. High-strength fiber-reinforced concrete in structures for general construction and special purposes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 39–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>
9. Al-Surrayvi H.G.H., Goncharova M.A., Zaeva A.G. Synthesis of composites on the basis of local raw materials under the influence of aggressive environment. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 69–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-69-74>
10. Goncharova M.A., Komarichev A.V., Karaseva O.V. Composite injection materials with two-stage magnetic processing systems hardening. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No. 6 (74), pp. 114–120. (In Russian).
11. Certificate of state registration of the computer program No. 2023610509 RF. *Program for the selection of the composition of lightweight concrete without additives*. Goncharova M.A., Yudina A.O., Dergunova E.S. Declared 12.27.2022. (In Russian).
12. Certificate of state registration of the computer program No. 2023618934 RF. *Program for calculating the composition of concrete of various structures*. Goncharova M.A., Myakiev A.H., Dergunova E.S. Declared 04.25.2023.

14. Смирнов В.А., Королев Е.В. Иерархическое моделирование строительных материалов как дисперсных систем: специализированная программная реализация // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-43-53>
15. Строкова В.В., Нецвет Д.Д., Нелубова В.В., Серенков И.В. Свойства композиционного вяжущего на основе наноструктурированной суспензии // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-50-54>
16. Шмитько Е.И., Верлина Н.А. Процессы прессформования и их влияние на качество кирпича-сырца // *Строительные материалы*. 2015. № 10. С. 5–7. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-730-10-5-7>
17. Шмитько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на влажностную усадку бетонов // *Строительные материалы*. 2018. № 4. С. 48–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-48-51>
18. Шмитько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на влажностную усадку бетонов // *Строительные материалы*. 2018. № 4. С. 48–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-48-51>
19. Вернигорова В.Н., Саденко С.М. Структура бетонной смеси и роль воды в ее физико-химическом преобразовании в бетон // *Строительные материалы*. 2018. № 4. С. 52–55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-52-55>
13. Goncharova M.A., Krokhotin V.V., Ivashkin A.N. The influence of fiber reinforcement on the properties of the selfcompacting concrete mix and concrete. *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299, pp. 112–117. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.112
14. Smirnov V.A., Korolev E.V. Building materials as disperse systems: multiscale modeling with dedicated software. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 43–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-43-53>
15. Stokova V.V., Netsvet D.D., Nelubova V.V., Serenkov I.V. Properties of composite binder based on nanostructured suspension. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 1–2, pp. 50–54. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-50-54>
16. Shmit'ko E.I., Verlina N.A. Press-molding processes and their influence on adobe brick quality. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 10, pp. 5–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-730-10-5-7>
17. Shmit'ko E.I., Bel'kova N.A., Makushina Yu.V. Influence of surfactants on humid shrinkage of concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 4, pp. 48–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-48-51>
19. Vernigorova V.N., Sadenko S.M. Concrete mix structure and role of water in its physical-chemical transformation in concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 4, pp. 52–55. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-52-55>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА



МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

С.В. ФЕДОСОВ¹, академик РААСН, д-р техн. наук, профессор (FedosovSV@mgsu.ru);
М.О. БАКАНОВ², советник РААСН, д-р техн. наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса
«Пожаротушение» (mask-13@mail.ru)

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

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

Эволюция математических моделей процессов нестационарной тепло-(массо-) проводности в телах канонической формы

В настоящее время существует большое количество материалов, которые подвергаются термическому воздействию при производстве. С точки зрения принципов геометрии их форма может быть сведена к классическим телам канонической формы: пластина, цилиндр, сфера. При термической обработке твердых материалов (тепловлажностная обработка, сушка, обжиг) потенциалы переноса (температура, массосодержание) критически изменяются относительно времени процесса. При решении краевых задач тепло- и массо-(влаго-) проводности в аналогичных случаях предлагается применять зональный метод и метод микропроцессов. Основные позиции метода микропроцессов, применительно к моделированию краевых задач тепломассопереноса для тел канонической формы при граничных условиях I рода (условиях Дирихле), были изложены в предыдущих статьях авторов. В настоящей работе изложена методика, основанная на методе микропроцессов при решении краевых задач тепло- и влагопроводности при более общих граничных условиях, условиях III рода (Римана–Ньютона). Высокая адаптивность этих условий заключается в том, что в зависимости от значений числа Био (Bi) они преобразуются в условие I рода ($Bi \rightarrow 0$) или II рода ($Bi \rightarrow \infty$). В работе показано, что для математического моделирования процессов тепломассопереноса в системах с твердой фазой на основе метода микропроцессов перспективным является поиск решений в области малых значений чисел Фурье ($Fo < 0,1$). Приведены математические выкладки решения соответствующих краевых задач и показаны примеры результатов их численной реализации. Решение задач теплопроводности и диффузии для тел, в том числе канонической формы, получают в форме рядов Фурье, что характерно для условий с неравномерным начальным распределением потенциалов переноса теплоты и массы вещества, но решений для малых значений чисел Фурье в источниках не приводится. В то же время с уменьшением времени процесса уменьшаются и числовые значения критериев Фурье и тем самым становится больше членов бесконечного ряда, что влечет за собой нарастание ошибки при дальнейших вычислениях. В работе приведены решения для тел канонической формы – пластины, цилиндра и сферы, также представлены номограммы безразмерной температуры поверхности тела в зависимости от значений чисел Био и Фурье при конкретных значениях числа Bi .

Ключевые слова: термическая обработка, тепломассоперенос, пластина, цилиндр, сфера, «зональный» метод, метод микропроцессов, малые значения числа Фурье.

Для цитирования: Федосов С.В., Баканов М.О. Эволюция математических моделей процессов нестационарной тепло-(массо-) проводности в телах канонической формы // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 54–62.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-54-62>

S.V. FEDOSOV¹, Academician Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Doctor of Sciences (Engineering), Professor (FedosovSV@mgsu.ru),
M.O. BAKANOV², Adviser of RAACS, Doctor of Sciences (Engineering), Head of the Educational and Scientific Complex "Fire Fighting"(mask-13@mail.ru)

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

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

Evolution of Mathematical Models of Processes of Non-Stationary Heat (Mass) Conduction in Bodies of Canonical Form

Currently, there are a large number of materials that are thermally affected during their production. From the point of view of the principles of geometry, their shape can be reduced to classical bodies of canonical form: a plate, a cylinder, a ball. In the heat treatment of solid materials (heat and moisture treatment, drying, firing), the transfer potentials (temperature, mass content) change critically with respect to the process time. When solving boundary value problems of heat and mass (moisture) conductivity in similar cases, it is proposed to use the zonal method and the method of micro-processes. The main positions of the method of micro-processes, as applied to modeling boundary value problems of heat and mass transfer for canonical bodies under boundary conditions of the first kind (Dirichlet conditions), were outlined in previous articles by the authors. In this paper, a technique based on the method of micro-processes for solving boundary value problems of heat and moisture conduction under more general boundary conditions, conditions of the third kind (Riemann–Newton) is presented. The high adaptability of these conditions lies in the fact that, depending on the values of the Biot number (Bi), they are transformed into a condition of the first kind ($Bi \rightarrow 0$) or the second ($Bi \rightarrow \infty$). The paper shows that for mathematical modeling of heat and mass transfer processes in systems with a solid phase based on the method of micro-processes, it is promising to search for solutions in the field of small Fourier numbers ($Fo < 0.1$). Mathematical calculations for solving the corresponding boundary value problems are given and examples of the results of their numerical implementation are shown. The solution to the problems of heat conduction and diffusion for bodies, including the canonical form, is obtained in the form of Fourier series, which is typical for conditions with an uneven initial distribution of heat and mass transfer potentials, but solutions for small Fourier numbers are not given in the sources. At the same time, as the process time decreases, the numerical values of the Fourier criteria also decrease, and thus there are more members of the infinite series, which entails an increase in the error in further calculations. The paper presents solutions for canonical bodies – plates, cylinders and spheres, also presents nomograms of the dimensionless temperature of the body surface depending on the values of the Biot and Fourier numbers at specific values of the Bi number.

Keywords: heat treatment, heat and mass transfer, plate, cylinder, sphere, “zonal” method, micro-processing method, small values of the Fourier number.

For citation: Fedosov S.V., Bakanov M.O. Evolution of mathematical models of processes of non-stationary heat (mass) conduction in bodies of canonical form. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 54–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-54-62>

Нестационарная теплопередача характеризуется непрерывным изменением температуры нагреваемого (охлаждаемого) материала во времени. При рассмотрении простых случаев, когда тепловой поток движется в одном направлении, дифференциальное уравнение теплопроводности решается с применением метода конечных разностей [1–6].

Известны решения [7] уравнения теплопереноса методом разделения переменных в однородных и изотропных телах простой формы, подвергающихся процессам охлаждения или нагрева без изменения фазы и с внутренним источником тепла, который является линейной функцией температуры и подчиняется однородным граничным условиям III рода. Решение задается суммой бесконечного ряда Фурье.

С использованием данного решения, в работе [8] также предлагается простой расчет времени охлаждения на основе приближения к первому члену этого решения (экспоненциальная зона), далее предлагается использовать максимальные значения, которых достигает температура в процессе охлаждения.

Существует множество методов прогнозирования теплопроводности, таких как экспериментальные, аналитические и численные [9–13]. Как правило, предпочтение отдается численным методам из-за таких факторов, как универсальность, простота и временные параметры расчета. Вместе с тем в численных методах всегда присутствует фактор неопределенности в результатах вычислений. Чтобы свести к минимуму неопределенность, важно понимать, как создается и распространяется ошибка в вычислениях, т. е. источники ошибок и критерии стабильности принятой численной схемы.

Для решения линейных задач теплопереноса, как правило, применяются следующие методы:

– классические: метод разделения переменных (метод Фурье), метод функции источников (функций Грина) [1, 10–12, 14];

– интегральных преобразований: в бесконечных пределах (методы Лапласа, Лапласа–Карсона, Фурье, Ханкеля), в конечных пределах (методы Фурье и Ханкеля) [1, 10–12, 14].

Для решения нелинейных задач теплопереноса разрабатываются способы, основанные на совместном использовании нескольких методов. Так, в работе [15] предложен эффективный способ решения краевых задач теплопереноса путем совместного применения интегрального преобразования Лапласа и вариационных методов. Все отмеченные выше методы являются аналитическими. В результате решения задачи любым из них возникает функциональная зависимость, позволяющая непосредственно определить значение искомой величины (влажности, температуры или давления) по заданному значению аргументов (координаты и времени).

Когда температура изменяется на любой границе поверхности материала, тепловой поток, распространяющийся через него, также изменяется, до тех пор пока не будут достигнуты стационарные условия.

В реальных условиях процесс теплообмена в технологических процессах находится в нестационарном режиме и, следовательно, изменяется во времени. На неустойчивость процесса теплообмена влияют колебания температуры на технологическом участке, внутренние тепловые эффекты обрабатываемого материала и другие факторы, влияющие на тепловой баланс процесса термической обработки.

В работе [6] при построении расчетной схемы для определения нестационарного теплообмена материал разделяют на определенное количество условных слоев. Условный слой — это толщина материала, в которой происходит предполагаемый процесс устойчивого теплопереноса при постоянном тепловом потоке по всей площади образца. Один из ключевых параметров, который влияет на точность расчета нестационарного теплопереноса, является шаг (интервал) по времени. Этот параметр определяет время, в течение которого температура последовательно передается через условный слой. Температуропроводность — это параметр, который авторы учитывали при определении скорости выравнивания температуры в условном слое. Комбинацию всех этих параметров характеризуют числа Фурье.

В теории теплопереноса число Фурье определяется как параметр, характеризующий подобие неустановившихся полей температуры в материале. Это число показывает условие устойчивого изменения температуры и может быть использовано для расчетов условий нестационарного теплопереноса. Это безразмерное время, которое вместе с тепловым критерием Био характеризует переходные эффекты теплопереноса [6, 16].

Ряд авторов [6, 17] также при решении уравнения нестационарной теплопроводности разделяли однородную плоскую стенку на элементарные Δx слои одинаковой толщины. Плоскости, разделяющие слои, обозначали числами $n-1$; n ; $n+1$, а время разделяли на равные интервалы Δt .

Одним из распространенных методов решения уравнения теплопроводности является метод разделения переменных, который был введен Ж. Фурье в 1820-х гг. и основан на разложении произвольной функции в ряд Фурье. В основе метода лежит предположение, что зависимая переменная является произведением ряда функций, каждая из которых является функцией одной независимой переменной. Это сводит дифференциальное уравнение в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, каждое из которых является функцией одной независимой переменной.

В случае нестационарной теплопроводности для плоской стенки, например зависимой переменной, является функция решения, которая выражается как $\theta = X(\bar{x})\Gamma(\tau)$; метод решения сводится к двум обыкновенным дифференциальным уравнениям, одному для \bar{x} , а другому для τ .

Метод применим, если геометрия исследуемого тела проста и конечна (например, пластина, цилиндр или сфера), так, чтобы граничные поверхности были

описаны простыми математическими функциями, а дифференциальное уравнение и граничные и начальные условия являлись линейными с одним неоднородным членом. Если формулировка включает в себя несколько неоднородных членов, задача делится на равное количество более простых задач, каждая из которых включает только один однородный член, после чего решение объединяется методом суперпозиции.

Однако при практическом использовании решений, полученных классическим методом разделения переменных Фурье, исследователь зачастую сталкивается с трудностями вычислительного характера. Трудности эти обусловлены тем, что получаемые методом Фурье решения имеют вид бесконечных рядов, сходимость которых резко ухудшается с уменьшением числа Фурье. Отмеченные «неудобства» приобретают принципиальное значение в том случае, когда определение полей влагосодержаний и температуры является не конечной целью расчета, а лишь промежуточной стадией более сложной задачи. В этих условиях предпочтителен другой способ решения уравнения нестационарной теплопроводности: метод интегральных преобразований Лапласа, основанный на переводе уравнения теплопроводности в область изображений, последующем анализе решения в комплексной плоскости, асимптотическом разложении решения в быстроходящийся ряд и возвращении в область оригиналов.

Ценность решений краевых задач тепломассопереноса в высокой степени определяется экспериментальными данными по зависимостям коэффициентов переноса, и в первую очередь тепло- и массопроводности, от потенциалов переноса. Исторически в отечественной науке существуют и развиваются два основных направления: зональный метод [9] и метод микропроцессов [10].

Зональный метод близок по сущности методу микропроцессов, но имеет ряд отличий, например: в зональном методе весь диапазон влагосодержаний разбивается на ряд концентрационных зон и по среднему влагосодержанию в зонах выбираются значения теплофизических характеристик материала; в методе микропроцессов оперируют диапазонами (интервалами) времени, поэтому нужно для каждой концентрационной зоны рассчитывать сначала конечное влагосодержание в зоне, затем определять среднее влагосодержание в зоне и по нему определять значения теплофизических характеристик и далее повторять расчет. Метод микропроцессов и зональный метод были разработаны для того, чтобы учитывать изменение в ходе процесса тепломассопереноса теплофизических характеристик материала, которые являются функциями его влагосодержания и температуры.

В работе [12] описаны случаи синтеза математических моделей процессов тепломассопереноса в телах канонической формы (пластина, цилиндр, сфера). Проблема рассмотрена для задач теплопроводности и диффузии в твердых телах. Вместе с тем для упрощения математических преобразований изложены зада-

чи с граничными условиями I рода, называемые также условиями Дирихле [14]. Решение краевых задач тепло- и влагопроводности при общих граничных условиях III рода (Римана–Ньютона) обладает своей универсальностью, так как в зависимости от значений числа Био (для теплообменных процессов – Bi , для массообменных – Bi_m), они преобразуются в условие I рода ($Bi, Bi_m \rightarrow 0$) или II рода ($Bi, Bi_m \rightarrow \infty$).

При этом задается закон изменения потенциала переноса (теплоты и массы) на границе твердого тела с окружающей средой.

В [1] приведены выражения для расчета полей температуры в зависимости от теплофизических параметров, а также полей потенциалов массопереноса.

В работе академика А.В. Лыкова и профессора Ю.А. Михайлова [12] представлены решения широкого спектра задач теплопроводности и диффузии для тел различной конфигурации, в том числе и тел канонической формы. Наряду с этим можно выделить две принципиальные позиции. Первая – решения, полученные в форме рядов Фурье, характерна для задач с неравномерными начальными распределениями потенциалов переноса теплоты и массы вещества. В случае равномерных начальных распределений из полученных решений легко получают частные случаи для равномерных начальных условий. При этом решений для малых значений чисел Фурье ($Fo, Fo_m < 0,1$) не приводится.

Также, как уже не раз упоминалось в специальной литературе [10], решения в форме рядов Фурье обладают неприятной особенностью: с уменьшением времени процесса уменьшаются и числовые значения критериев Фурье, характеризующих подобие нестационарных процессов тепломассопереноса (Fo, Fo_m). Это, в свою очередь, приводит к увеличению числа членов бесконечного ряда и нарастанию ошибки при дальнейших вычислениях. Ключевое значение эти факторы приобретают при расчетах с использованием зонального метода [9] и метода микропроцессов [10].

В работе [1] предложена методика решений задач тепломассопереноса при неравномерных начальных распределениях потенциалов переноса. Целью настоящей работы является описание принципов разработки методики решения краевых задач тепло- и массопроводности для более общих граничных условий – условий III рода, или условий Ньютона [12]. Авторы ставят перед собой следующие задачи:

- 1) разработка аналитических решений задач тепломассопереноса при неравномерных начальных распределениях потенциалов переноса для тел канонической формы при малых значениях числа Фурье;
- 2) решение задачи тепломассопереноса при неравномерных начальных распределениях потенциалов переноса для тел канонической формы, используя безразмерные переменные для прогнозирования изменения температуры в теле;
- 3) графическая интерпретация зависимостей безразмерного распределения температуры для поверхностей пластины, цилиндра и сферы.

Следует отметить тот факт, что граничные условия являются общими для задач теплопроводности и диффузии. При $Bi, Bi_m \rightarrow \infty$ они переходят в условия II рода (условие Неймана), а при $Bi, Bi_m \rightarrow 0$ переходят в условия I рода (условие Дирихле). Ниже излагается краевая задача нестационарной теплопроводности для тел канонической формы при граничных условиях II и III рода.

Материалы и методы

В качестве математической основы для решения краевых задач тепломассопереноса используется дифференциальное уравнение нестационарного переноса субстанции (теплоты или массы вещества) с соответствующими краевыми (начальными и граничными) условиями:

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \cdot \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \right], \theta > 0, 0 \leq x \leq R; \quad (1)$$

$$\theta(x, 0) = \theta_0(x); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\alpha [\theta_c - \theta(R, \tau)] = \lambda \frac{\theta(R, \tau)}{x}, \quad (4)$$

где $\Gamma=0$ для задач теплопереноса для неограниченной пластины; $\Gamma=1$ для задач теплопереноса для неограниченного цилиндра; $\Gamma=2$ для задач теплопереноса для сферы.

Введем безразмерные величины:

$$\theta(\bar{x}, Fo) = \frac{\theta_c - \theta(x, \tau)}{\theta_c - \theta_0}; \quad Fo = \frac{a\tau}{R^2}; \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}; \quad \bar{x} = \frac{x}{R}, \quad (5)$$

где a – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot K)$; λ – теплопроводность, $Вт/(m \cdot K)$; θ_c – температура среды, K ; θ_0 – начальная температура материала, K .

В части задачи массопроводности получаем:

$$\frac{\partial \theta_m(x, \tau)}{\partial \tau} = k \left[\frac{\partial^2 \theta_m(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \cdot \frac{\partial \theta_m(x, \tau)}{\partial x} \right], \theta_m > 0, 0 \leq x \leq R; \quad (6)$$

$$\theta_m(x, 0) = \theta_{0,m}(x); \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta_m(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

$$\beta [\theta_{c,m} - \theta_m(R, \tau)] = \lambda \frac{\theta_m(R, \tau)}{x}. \quad (9)$$

Для задач массопереноса по аналогии можно записать:

$$\theta_m(\bar{x}, Fo_m) = \frac{\theta_{0,m} - \theta_m(x, \tau)}{\theta_{0,m} - \theta_{c,m}}; \quad Fo_m = \frac{k\tau}{R^2}; \quad Bi_m = \frac{\beta R}{k}, \quad (10)$$

где β – коэффициент массоотдачи, m/c ; k – коэффициент массопроводности, m^2/c ; θ_m – концентрация переносимого вещества в твердой фазе, $кг/кг$; $\theta_{c,m}$ – концентрация вещества в твердой фазе, равновесная с концентрацией в газовой, $кг/кг$.

В безразмерных переменных краевая задача теплопереноса примет следующий вид ($\Gamma=0$):

$$\frac{\partial \theta(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}; \quad Fo > 0; \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1; \quad (11)$$

$$\theta(\bar{x}, 0) = \frac{\theta_c - \theta(x, 0)}{\theta_c - \theta_0} = \theta_0(\bar{x}); \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[\frac{\theta_c - \theta(0, Fo)}{\theta_c - \theta_0} \right] = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta(1, Fo)}{\partial \bar{x}} = -Bi \cdot \theta(1, Fo). \quad (14)$$

Существует достаточно много методов решения краевой задачи, описанной системой уравнений (11)–(14); одним из наиболее перспективных является интегральное преобразование Лапласа [2] по временной переменной Fo [14, 18], тогда можно записать:

$$\frac{d^2 \theta(\bar{x}, s)}{d\bar{x}^2} - s \cdot \theta(\bar{x}, s) + \theta_0(\bar{x}) = 0; \quad (15)$$

$$\frac{d\theta(0, s)}{d\bar{x}} = 0; \quad (16)$$

$$\frac{d\theta(1, s)}{d\bar{x}} = -Bi \cdot \theta(1, s). \quad (17)$$

Уравнение (15) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка [13].

Решая его с использованием граничных условий (16), (17) и опуская несложные, но громоздкие преобразования, запишем решение в области комплексных переменных:

$$\theta(\bar{x}, s) = \frac{(Bish\sqrt{s} + \sqrt{s}ch\sqrt{s})ch(\sqrt{s}\bar{x})}{\sqrt{s}(Bich\sqrt{s} + \sqrt{s}sh\sqrt{s})} \int_0^1 \theta_0(\xi)ch(\sqrt{s}\xi)d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \left[sh(\sqrt{s}\bar{x}) \int_0^{\bar{x}} \theta_0(\xi)ch(\sqrt{s}\xi)d\xi + sh(\sqrt{s}\bar{x}) \int_{\bar{x}}^1 \theta_0(\xi)ch(\sqrt{s}\xi)d\xi \right], \quad (18)$$

где ξ – переменная, изменяющаяся от 0 до \bar{x} .

Преобразования из области изображений в область оригиналов производятся по формуле обратного преобразования [13]:

$$\theta(\bar{x}, Fo) = L^{-1}[\theta(\bar{x}, s)] = L^{-1} \left[\frac{\varphi(s)}{\psi'(s)} \right] \Big|_{s \rightarrow 0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(s)}{\psi'_n(s)} \exp(s_n Fo), \quad (19)$$

где $\varphi(s)$ и $\psi'(s)$ – соответственно функции, находящиеся в числителе и знаменателе (18).

В результате математических преобразований в соответствии с формулой (19) оно принимает следующий окончательный вид:

$$\theta(\bar{x}, Fo) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n \exp(-\mu_n^2 Fo)}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos(\mu_n \bar{x}) \int_0^1 T_0(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi. \quad (20)$$

Величина μ_n определяет множество корней характеристического уравнения:

$$\text{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi}. \quad (21)$$

Аналогично для краевой задачи массопереноса будут справедливы выражения:

$$\theta_m(\bar{x}, Fo_m) = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m \exp(-\mu_m^2 Fo_m)}{\mu_m + \sin \mu_m \cos \mu_m} \cdot \cos(\mu_m \bar{x}) \int_0^1 T_0(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi; \quad (22)$$

$$\text{ctg} \mu_m = \frac{\mu_m}{Bi_m}. \quad (23)$$

На основании принципов изложенной методологии решения краевых задач тепломассопереноса приведем записи постановки и решения задач для цилиндра и сферы.

Постановка задачи теплопереноса для неограниченного цилиндра ($\Gamma=1$):

$$\frac{\partial \theta(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \theta(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}}, \quad Fo > 0, \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad (24)$$

$$\theta(\bar{r}, Fo) \Big|_{Fo=0} = \theta_0(\bar{r}); \quad (25)$$

$$\frac{\partial \theta(0, Fo)}{\partial \bar{r}} = 0, \quad \theta(0, Fo) \neq \infty; \quad (26)$$

$$\frac{\partial \theta(1, Fo)}{\partial \bar{r}} = -Bi \cdot \theta(1, Fo). \quad (27)$$

В области комплексных переменных эта задача будет иметь следующий вид:

$$\frac{d^2 \theta(\bar{r}, s)}{d \bar{r}^2} - s \theta(\bar{r}, s) + \theta_0(\bar{r}) + \frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{d \theta(\bar{r}, s)}{d \bar{r}} = 0; \quad (28)$$

$$\frac{d \theta(0, s)}{d \bar{r}} = 0, \quad \theta(0, s) \neq \infty; \quad (29)$$

$$\frac{d \theta(1, s)}{d \bar{r}} = -Bi \cdot \theta(1, s). \quad (30)$$

Снова, опуская громоздкие преобразования, приведем решения задачи (28)–(30) в области изображений:

$$\theta(\bar{r}, s) = \frac{I_0(\sqrt{s \bar{r}})}{\Psi(s)} \left\{ \Psi_1(s) \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) I_0(\sqrt{s \xi}) d\xi + \right. \\ \left. + \Psi(s) \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) K_0(\sqrt{s \xi}) d\xi \right\} - \frac{\Psi_1(s)}{\Psi(s)} \left\{ I_0(\sqrt{s \bar{r}}) \int_0^{\bar{r}} \xi \theta_0(\xi) K_0(\sqrt{s \xi}) d\xi - \right. \\ \left. - K_0(\sqrt{s \bar{r}}) \int_0^{\bar{r}} \xi \theta_0(\xi) I_0(\sqrt{s \xi}) d\xi \right\}, \quad (31)$$

где $I_0(\sqrt{s})$, $I_0(\sqrt{s \bar{r}})$ – функции Бесселя I рода от чисто мнимого аргумента нулевого порядка (модифицированная функция Бесселя I рода нулевого порядка); функции $\Psi(s)$ и $\Psi_1(s)$ являются обобщенными полиномами относительно комплексной переменной s ; $K_0(\sqrt{s})$, $K_0(\sqrt{s \bar{r}})$ – функции Бесселя II рода нулевого порядка от чисто мнимого аргумента [18].

Применяя к полученному выражению вновь процедуру обратного преобразования Лапласа в соответствии с (19), получим решение в форме:

$$\theta(\bar{r}, Fo) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n J_0(\mu_n \bar{r}) [\mu_n Y_1(\mu_n) + Bi Y_0(\mu_n)]}{\mu_n J_0(\mu_n) + Bi J_1(\mu_n)} \exp(-\mu_n^2 Fo) \cdot \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) J_0(\mu_n \xi) d\xi, \quad (32)$$

где $J_0(\mu_n)$, $J_0(\mu_n \bar{r})$, $J_1(\mu_n)$, $Y_0(\mu_n)$, $Y_1(\mu_n)$ – обычные функции Бесселя, определенные в специальной литературе, например [10].

И вновь отметим, что аналогичным будет и решение задачи массопереноса. При этом у величин μ , Bi , Fo нижним индексом становится величина m .

Для тела сферической формы ($\Gamma=2$) запишем:

$$\frac{\partial \theta(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2} + \frac{2}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial \theta(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}}, \quad Fo > 0, \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad (33)$$

$$\theta(\bar{r}, Fo) \Big|_{Fo=0} = \theta_0(\bar{r}); \quad (34)$$

$$\frac{\partial \theta(0, Fo)}{\partial \bar{r}} = 0, \quad \theta(0, Fo) \neq \infty; \quad (35)$$

$$\frac{\partial \theta(1, Fo)}{\partial \bar{r}} = -Bi \cdot \theta(1, Fo). \quad (36)$$

Для граничного условия в центре шара появилось дополнение, что значение температуры в центре не может иметь бесконечной величины.

Производим замену переменной по правилу:

$$U(\bar{r}, Fo) = \bar{r} \theta(\bar{r}, Fo). \quad (37)$$

В результате получим:

$$\frac{\partial U(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 U(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}^2}. \quad (38)$$

В дальнейшем, выполняя преобразования по процедуре получения решения для неограниченной пластины, получаем решение в области изображений по Лапласу:

$$\theta(\bar{r}, s) = \frac{sh(\sqrt{s \bar{r}})}{\bar{r} \sqrt{s} [(Bi-1)sh\sqrt{s} + \sqrt{s} \cdot ch\sqrt{s}]} \left\{ \sqrt{s} \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) ch\sqrt{s(1-\xi)} d\xi + \right. \\ \left. + (Bi-1) \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) sh\sqrt{s(1-\xi)} d\xi \right\} - \frac{1}{\bar{r} \sqrt{s}} \int_0^{\bar{r}} \xi \theta_0(\xi) sh\sqrt{s(\bar{r}-\xi)} d\xi. \quad (39)$$

Окончательное решение краевой задачи в области оригиналов имеет следующий вид:

$$\theta(\bar{r}, Fo) = -\frac{2}{\bar{r}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[(Bi-1) \cos \mu_n - \mu_n \sin \mu_n] \sin(\mu_n \bar{r})}{Bi \cdot \cos \mu_n - \mu_n \sin \mu_n} \cdot \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) \sin(\mu_n \xi) d\xi \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (40)$$

Характеристическое уравнение для поиска множества корней в данном случае:

$$\text{tg} \mu_n = -\frac{\mu_n}{Bi-1}. \quad (41)$$

И вновь отметим, что решение для задачи массопереноса (диффузии в твердом теле) будет иметь аналогичный вид при использовании обозначений:

$$\theta_m(\bar{r}, Fo_m); \quad Bi_m, \quad \mu_m. \quad (42)$$

Необходимо отметить, что в области больших чисел Фурье достаточно точные результаты получаются при использовании всего лишь одного, первого члена ряда. С уменьшением числа Фурье (следовательно, и времени процесса) число членов ряда, которое надо учитывать для обеспечения заданной точности рас-

четов, резко возрастает. Соответственно возрастает и компьютерное время, затрачиваемое на расчет. Эти трудности приобретают принципиальное значение в тех случаях, когда весь анализируемый процесс разбивается на достаточно большое количество микропроцессов, для каждого из которых выполняется условие ($Fo < 0,1$). Все аналитические методы позволяют получать достаточно точные решения при $Fo > 0,1$, и лишь преобразование Лапласа дает возможность получить решения, точность которых не уменьшается, а возрастает с уменьшением числа Фурье.

При решении краевых задач тепломассопереноса для области малых значений чисел Фурье следует использовать следующие свойства гиперболических функций [10]:

$$ch\sqrt{s} = \frac{1}{2}(e^{\sqrt{s}} + e^{-\sqrt{s}}) \equiv \frac{1}{2}e^{\sqrt{s}}; \quad (43)$$

$$sh\sqrt{s} = \frac{1}{2}(e^{\sqrt{s}} - e^{-\sqrt{s}}) \equiv \frac{1}{2}e^{\sqrt{s}}; \quad (44)$$

$$ch\sqrt{s\bar{x}} = \frac{1}{2}(e^{\sqrt{s\bar{x}}} + e^{-\sqrt{s\bar{x}}}); \quad (45)$$

$$sh\sqrt{s\bar{x}} = \frac{1}{2}(e^{\sqrt{s\bar{x}}} - e^{-\sqrt{s\bar{x}}}). \quad (46)$$

В результате выражения (18), (31) и (39) преобразуются к следующему виду:

– пластина:

$$\theta(\bar{x}, s) = \frac{1}{2\sqrt{s}} \left\{ \int_0^{\bar{x}} \theta_0(\xi) e^{\sqrt{s}(\bar{x}-\xi)} d\xi + \int_{\bar{x}}^1 \theta_0(\xi) e^{\sqrt{s}(\xi-\bar{x})} d\xi + \int_0^1 \theta_0(\xi) e^{-\sqrt{s}(\bar{x}+\xi)} d\xi \right\} - \frac{Bi-\sqrt{s}}{2\sqrt{s}(Bi+\sqrt{s})} \int_0^1 \theta_0(\xi) e^{\sqrt{s}\xi} d\xi \cdot [e^{\sqrt{s}(\bar{x}-2)} + e^{-\sqrt{s}(\bar{x}+2)}]; \quad (47)$$

– цилиндр:

$$\theta(\bar{r}, s) = \frac{1}{\psi(s)} \left\{ \sqrt{s} I_0(\sqrt{s}) \int_0^{\bar{r}} \xi \theta_0(\xi) K_0(\sqrt{s\bar{r}}) I_0(\sqrt{s}\xi) d\xi + \int_{\bar{r}}^1 \xi \theta_0(\xi) I_0(\sqrt{s\bar{r}}) K_0(\sqrt{s}\xi) d\xi + Bi I_0(\sqrt{s}) \int_0^{\bar{r}} \xi \theta_0(\xi) K_0(\sqrt{s\bar{r}}) I_0(\sqrt{s}\xi) d\xi + \int_{\bar{r}}^1 \xi \theta_0(\xi) I_0(\sqrt{s\bar{r}}) K_0(\sqrt{s}\xi) d\xi + \sqrt{s} K_1(\sqrt{s}) I_0(\sqrt{s\bar{r}}) \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) I_0(\sqrt{s}\xi) d\xi - Bi K_0(\sqrt{s}) I_0(\sqrt{s\bar{r}}) \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) I_0(\sqrt{s}\xi) d\xi \right\}; \quad (48)$$

– сфера:

$$\theta(\bar{r}, s) = \frac{1}{2\bar{r}\sqrt{s}} \left\{ \int_0^{\bar{r}} \xi \theta_0(\xi) e^{-\sqrt{s}(\bar{r}-\xi)} d\xi + \int_{\bar{r}}^1 \xi \theta_0(\xi) e^{-\sqrt{s}(\xi-\bar{r})} d\xi - \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) e^{-\sqrt{s}(\bar{r}+\xi)} d\xi \right\} + \frac{(Bi-1)-\sqrt{s}}{2\bar{r}\sqrt{s}[(Bi-1)+\sqrt{s}]} \cdot \left\{ \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) e^{-\sqrt{s}(2+\bar{r}-\xi)} d\xi - \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) e^{-\sqrt{s}(2-\bar{r}-\xi)} d\xi \right\}. \quad (49)$$

Результаты исследования

Соответствующие окончательные решения краевых задач в области оригиналов для тел канониче-

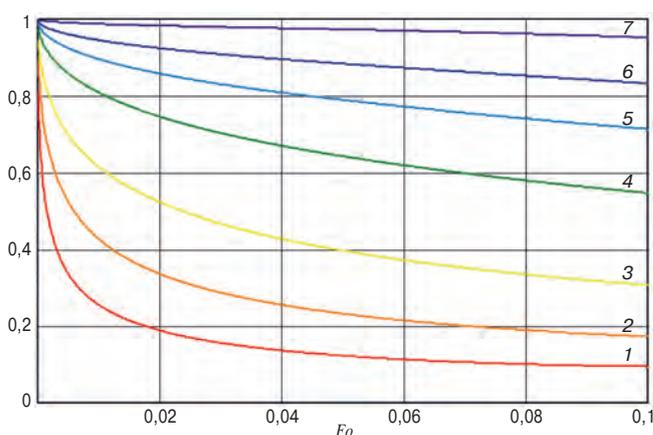


Рис. 1. Динамика безразмерной температуры поверхности пластины в зависимости от значений чисел Био и Фурье при $Bi: 1 - 20; 2 - 10; 3 - 5; 4 - 2; 5 - 1; 6 - 0,5; 7 - 0,1$

Fig. 1. Dynamics of the dimensionless temperature of the plate surface depending on the values of the Biot and Fourier numbers at $Bi: 1 - 20; 2 - 10; 3 - 5; 4 - 2; 5 - 1; 6 - 0,5; 7 - 0,1$

ской формы (пластина, цилиндр, сфера) будут иметь следующий вид:

– пластина (рис. 1):

$$\theta(\bar{x}, Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Fo}} \left\{ \int_0^1 \theta_0(\xi) \exp\left[-\frac{(\bar{x} \pm \xi)^2}{4Fo}\right] d\xi + \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \exp\left[-\frac{(2 \pm \bar{x} - \xi)^2}{4Fo}\right] d\xi \right\} - Bi \exp(Bi^2 Fo) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \exp[Bi(2 \pm \bar{x} - \xi)] \operatorname{erfc}\left[\frac{2 \pm \bar{x} - \xi}{2\sqrt{Fo}} + Bi\sqrt{Fo}\right] d\xi. \quad (50)$$

На рис. 1 представлены кривые безразмерной температуры в зависимости от времени для различных $Bi (Bi_m)$ и $Fo (Fo_m)$. Из анализа рисунков можно заключить, что с увеличением числа $Bi (Bi_m)$ зависимость температуры имеет параболический характер, а при малых значениях числа $Bi (Bi_m)$ зависимость приобретает линейный вид. При больших $Bi (Bi_m)$ внутреннее термическое сопротивление теплопроводности намного больше внешнего, поэтому и перепад температуры намного больше разности температуры между поверхностью и окружающей средой;

– цилиндр (рис. 2):

$$\theta(\bar{r}, Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Fo\bar{r}}} \int_0^1 \xi^{1/2} \theta_0(\xi) \left\{ \exp\left[-\frac{(\bar{r}-\xi)^2}{4Fo}\right] + \exp\left[-\frac{(2-\bar{r}-\xi)^2}{4Fo}\right] \right\} d\xi - \frac{Bi}{\bar{r}} \int_0^1 \xi^{1/2} \theta_0(\xi) \exp[Bi(2-\bar{r}-\xi) + Bi^2 Fo] \operatorname{erfc}\left[\frac{2-\bar{r}-\xi}{2\sqrt{Fo}} + Bi\sqrt{Fo}\right] d\xi. \quad (51)$$

Анализируя данные, представленные на рис. 2, можно отметить, что участки интенсивного изменения температуры наблюдаются в начале нагрева при $Fo (Fo_m)$ от 0 до 0,04, после чего наступает тепловое равновесие. Характерным признаком области малых значений чисел Фурье является наличие пиковых изменений температуры в начале нагрева по причине высокой скорости прогресса поверхности материала;

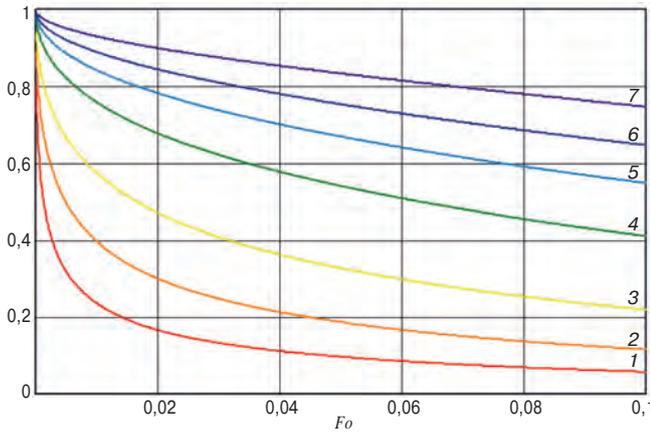


Рис. 2. Динамика безразмерной температуры поверхности цилиндра при Bi : 1 – 20; 2 – 10; 3 – 5; 4 – 2; 5 – 1; 6 – 0,5; 7 – 0,1
Fig. 2. Dynamics of the dimensionless cylinder surface temperature at Bi : 1 – 20; 2 – 10; 3 – 5; 4 – 2; 5 – 1; 6 – 0.5; 7 – 0.1

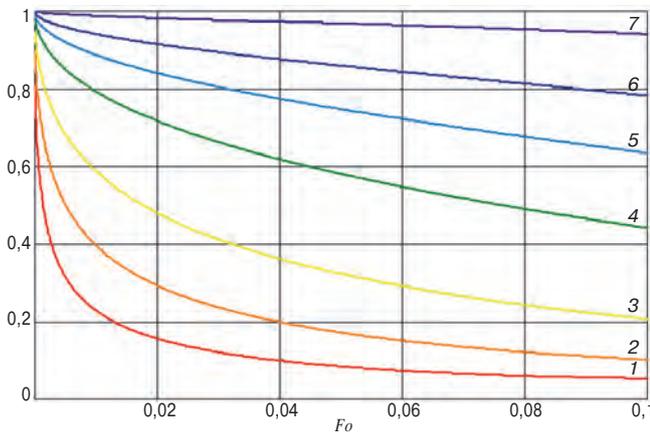


Рис. 3. Динамика безразмерной температуры поверхности сферы в зависимости от чисел Био и Фурье при Bi : 1 – 20; 2 – 10; 3 – 5; 4 – 2; 5 – 1; 6 – 0,5; 7 – 0,1
Fig. 3. Dynamics of dimensionless temperatures of the sphere surface depending on the Biot and Fourier numbers for Bi : 1 – 20; 2 – 10; 3 – 5; 4 – 2; 5 – 1; 6 – 0.5; 7 – 0.1

– сфера (рис. 3):

$$\theta(\bar{r}, Fo) = \frac{(\pm)1}{2\bar{r}\sqrt{\pi Fo}} \left\{ \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) \exp\left[-\frac{(\bar{r} \pm \xi)^2}{4Fo}\right] d\xi + \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) \exp\left[-\frac{(2\bar{r} - \xi)^2}{4Fo}\right] d\xi \right\} - (\pm) \frac{(Bi-1)}{\bar{r}} \exp[(Bi-1)^2 Fo] \cdot \int_0^1 \xi \theta_0(\xi) \exp[(Bi-1)(2\bar{r} - \xi)] \operatorname{erfc}\left[-\frac{2\bar{r} - \xi}{2\sqrt{Fo}} + (Bi-1)\sqrt{Fo}\right] d\xi. \quad (52)$$

В целях придания большей компактности формулам ввели следующую форму запис:

$$f(\bar{x} \pm \xi) = f(\bar{x} + \xi) + f(\bar{x} - \xi).$$

Из рис. 3 можно выделить общую динамику кривых безразмерной температуры на поверхности сферы, характерных относительно рис. 1–2. Наиболее интенсивное изменение кривых безразмерной температуры наблюдается при значениях Fo (Fo_m) от 0 до 0,04 (для Bi (Bi_m)=20; 10; 5; 2), это свидетельствует о том, что при больших Bi (Bi_m) внутреннее термиче-

ское сопротивление теплопроводности намного больше внешнего, поэтому и перепад температуры намного больше разности температуры между поверхностью и окружающей средой.

Заключение и обсуждение

Следует уточнить тот факт, что решения задач теплопроводности и диффузии для тел, в том числе канонической формы, получают в форме рядов Фурье [1, 2, 9–11, 13, 18]. Это характерно для условий с неравномерным начальным распределением потенциалов переноса теплоты и массы вещества, но решений для малых значений чисел Фурье в источниках не приводится. Вместе с тем, чем меньше время процесса, тем меньше числовые значения критериев Фурье и тем больше членов бесконечного ряда, что влечет за собой нарастание ошибки при вычислении.

В работе продемонстрированы решения для тел канонической формы – пластины, цилиндра и сферы, также разработаны номограммы безразмерной температуры поверхности тела в зависимости от значений чисел Био и Фурье при конкретных значениях чисел Bi и Bi_m .

Номограммы позволяют с помощью простых геометрических операций исследовать функциональные зависимости температуры на поверхности тел канонической формы в зависимости от значений чисел Био и Фурье без громоздких вычислений при малых значениях числа Фурье, что способствует исключению ошибок при реализации методов расчета с использованием зонального метода [9, 19–21] и метода микропроцессов [2, 3, 10, 22–26].

Выводы

1. Установлено, что в области больших чисел Фурье достаточно точные результаты получаются при использовании всего лишь одного, первого члена ряда. С уменьшением числа Фурье (а следовательно, и времени процесса) число членов ряда, которое надо учитывать для обеспечения заданной точности расчетов, резко возрастает. Соответственно возрастает и компьютерное время, затрачиваемое на расчет. Эти трудности приобретают принципиальное значение в тех случаях, когда весь анализируемый процесс разбивается на достаточно большое количество микропроцессов, для каждого из которых выполняется условие $Fo, Fo_m \ll 0,1$. Все аналитические методы позволяют получать достаточно точные решения при $Fo, Fo_m > 0,1$, и лишь преобразование Лапласа дает возможность получить решения, точность которых не уменьшается, а возрастает с уменьшением числа Фурье.

2. Разработанные математические модели позволяют определять не только изменение температуры в пространстве (в объеме материала) и во времени, но также изменение градиентов температуры, так как в некоторых случаях знание градиентов этих величин может иметь большее практическое значение, чем знание самих этих показателей.

3. Получены приближенные аналитические зависимости для расчета нестационарной температуры в

телах канонической формы (пластина, цилиндр, сфера). Использование полученных решений возможно для оценки начальной стадии физического, в частности теплового, процесса при малых числах Фурье.

Определяя перспективы развития теории теплопереноса, необходимо обратить внимание на разработку методов моделирования предельных значений градиентов температуры (влажности). Наличие воды в строительных материалах играет ключевую роль во многих процессах, способствующих их термической деструкции. При переходе воды в различные фазовые состояния (замерзание или кипение) и в зависимости от воздействия внешней среды могут появляться точки деструкции в материалах, что может свидетельствовать о наличии в материале предельных градиентов. Различные соли, присутствующие в строительных материалах, могут способствовать локальным повреждениям в присутствии воды как растворителя и среды для влагопереноса. Так, например, при воздействии на бетонную конструкцию открытого пламени может произойти термическая деструкция блока и его дальнейшее разрушение вследствие резкого увеличения температуры (предельного температурного градиента). В данных условиях влага, находящаяся в бетоне, начинает вскипать, и процесс сопровождается нарастанием давления пара. Происходит разрушение поверхности бетонной конструкции, а также могут наблюдаться эффекты локальной термической деструкции на поверхности материала по причине возникновения предельных градиентов температуры. В приведенном примере ключевая роль отводится процессам переноса влаги и тепла при высоких температурах. Авторы видят решение данного класса проблем в разработке теории предельных градиентов, которая позволит моделировать и рассчитывать функциональные зависимости, позволяющие непосредственно определять значения величин влагосодержания, температуры или давления в различных материалах, учитывая факторы воздействия внешней среды.

Список литературы / References

1. Федосов С.В., Баканов М.О. Применение метода «микропроцессов» для моделирования процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2020. Т. 63. Вып. 10. С. 90–95. DOI: 10.6060/ivkkt.20206310.6275
1. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Application of the “microprocesses” method for modeling the processes of heat conduction and diffusion in bodies of canonical form. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2020. Vol. 63. Iss. 10, pp. 90–95. (In Russian) DOI: 10.6060/ivkkt.20206310.6275
2. Федосов С.В., Баканов М.О. Моделирование процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с применением метода «микропроцессов» для области малых значений числа Фурье // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 78–83. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6387
2. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Modeling of processes of heat conduction and diffusion in bodies of canonical form using the method of «microprocesses» for the region of small values of the Fourier number. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2021. Vol. 64. Iss. 10, pp. 78–83. (In Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6387
3. Баканов М.О. Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Ч. 1. Формирование динамики циклических нестационарных двумерных температурных полей. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2021. № 2. С. 87–102. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.87
3. Bakanov M.O. Modeling of high-temperature processes in foam glass technology. Part 1: Formation of the dynamics of cyclic non-stationary two-dimensional temperature fields. *Vestnik of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2021. No. 2, pp. 87–102. (In Russian). DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.87
4. Claesson J. Dynamic thermal networks: a methodology to account for time-dependent heat conduction. In book: *Research in Building Physics*. 2020. 1st Edition, pp. 407–415.
5. Stankevičius V., Barkauskas V. Pastatų atitvarų šiluminė fizika [Building physics]. Kaunas: Technologija. 2000. 286 p.
6. Pupeikis D., Stankevičius V., Burlingis A. The effect of the Fourier number on calculation of an unsteady heat transfer of building walls. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2010. Vol. 16. No. 2, pp. 298–305. DOI: No. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.34>
7. Hensen J.L.M., Nakhi A.E. Fourier and Biot numbers and the accuracy of conduction modelling. *Proceedings of BEP'94 Conference*. 1994, pp. 247–256.
8. Cuesta F.J., Lamúa M. Fourier series solution to the heat conduction equation with an internal heat source linearly dependent on temperature: application to chilling of fruit and vegetables. *Journal of food engineering*. 2009. Vol. 90. No. 2, pp. 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.036>
9. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2013. 478 с.
9. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffuziya v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh [Diffusion in chemical-technological processes]. Moscow: Kolos. 2013. 478 p.
10. Федосов С.В. Теплоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 363 с.
10. Fedosov S.V. Teplomassoperenosv tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii [Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry]. Ivanovo: IPK «PresSto». 2010. 363 p.

11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
11. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola. 1967. 600 p.
12. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
12. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. Theory of heat and mass transfer. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat. 1963. 535 p.
13. Мамонтов А.Е. Методы математической физики: Учебное пособие. Новосибирск: НГПУ, 2016. 129 с.
13. Mamontov A.E. Metody matematicheskoy fiziki: uchebnoye posobiye [Methods of mathematical physics] Novosibirsk: NGPU. 2016. 129 p.
14. Шамин Р.В. Концентрированный курс высшей математики. М.: URSS, 2017. 398 с.
14. Shamin R.V. Kontsentrirrovannyy kurs vysshey matematiki [Concentrated course of higher mathematics]. Moscow: URSS. 2017. 398 p.
15. Цой П.В. Методы расчета отдельных задач тепло-массопереноса. М.: Энергия, 1971. 384 с.
15. Tsoi P.V. Metody rascheta otdel'nykh zadach teplomassopere-nosa [Methods for calculating individual problems of heat and mass transfer]. Moscow: Energiya. 1971. 384 p.
16. Wang C.C. Application of the maximum principle for differential equations in combination with the finite difference method to find transient approximate solutions of heat equations and error analysis. *Numerical Heat Transfer. Part B: Fundamentals*. 2009. Vol. 55. No. 1, pp. 56–72. <https://doi.org/10.1080/10407790802557524>
17. Šadauskienė, J., Buska A., Burlingis A., Bliūdžius R., Gailius A. The effect of vertical air gaps to thermal transmittance of horizontal thermal insulating layer. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009. Vol. 15 (3), pp. 309–315. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.309-315.
18. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений. М.: URSS, 2018. 1080 с.
18. Kartashov E.M., Kudinov V.A. Analytical methods of the theory of heat conduction and its applications. Moscow: URSS. 2018. 1080 p. [Analytical methods of the theory of heat conduction and its applications]. Moscow: URSS. 2018. 1080 p.
19. Rudobashta S., Zuev N., Zueva G. Mathematical modeling and numerical simulation of seeds drying under oscillating infrared irradiation. *Drying Technology*. 2014. Vol. 32. No. 11, pp. 1352–1359. DOI: No. 10.1080 / 07373937.2014.892508
20. Rudobashta S., Zueva G. Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Drying Technology*. 2016. Vol. 34. No. 5, pp. 505–515. DOI: No. 10.1080/07373937.2015.1060997
21. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М. Исследование массопроводных свойств слоя семян // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2017. № 60 (7). С. 72–77. DOI: 10.6060/tcct.2017607.5556
21. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Dmitriev V.M. Study of the mass-conducting properties of the seed layer. *Izvestiya vuzov. Chemistry and chemical technology*. 2017. No. 60 (7), pp. 72–77. DOI: 10.6060/tcct.2017607.5556
22. Румянцева В.Е., Смельцов В.Л., Федосова Н.Л., Хрунов В.А., Костерин А.Я. Экспериментальные исследования процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов // *Приволжский научный журнал*. 2010. № 1 (13). С. 39–46.
22. Rumyantseva V.E., Smeltsov V.L., Fedosova N.L., Khrunov V.A., Kosterin A.Ya. Experimental studies of mass transfer processes during liquid corrosion of cement concretes. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2010. No. 1 (13), pp. 39–46. (In Russian).
23. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Лавринович С.С., Виталова Н.М. Сравнительный анализ уравнений распределения температур по толщине железобетонной панели в процессах тепловлажностной обработки // *Приволжский научный журнал*. 2015. № 3 (35). С. 70–76.
23. Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Lavrinovich S.S., Vitalova N.M. Comparative analysis of the equations of temperature distribution over the thickness of a reinforced concrete panel in the processes of heat and moisture treatment. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2015. No. 3 (35), pp. 70–76.
24. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Гоглев И.Н. Явления массопереноса в системе «Цементный раствор – композитная пластиковая арматура» на стадии структурообразования композита. Ч. 1. Физические представления и математическая постановка задачи // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 1. С. 118–123.
24. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Goglev I.N. Mass transfer phenomena in the «Cement mortar-composite plastic reinforcement» system at the stage of composite structure formation. Part 1. Physical representations and mathematical formulation of the problem. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2020. No. 1, pp. 118–123. (In Russian).
25. Красильников И.В., Красильникова И.А., Новикова У.А., Строкин К.В. Способ аппроксимации аналитическими уравнениями экспериментальных данных о динамике массопереноса в теле строительных конструкций. *Инженерные и социальные системы: Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ*. Иваново, 2021. С. 11–18.
25. Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A., Novikova U.A., Strokin K.B. Method of approximation by analytical equations of experimental data on the dynamics of mass transfer in the body of building structures. *In the collection: Engineering and social systems. Collection of scientific papers of the institute of architecture, construction and transport of IVSPU*. Ivanovo, 2021, pp. 11–18. (In Russian).
26. Чернявская А.С., Бобков С.П. Моделирование процессов теплопереноса в движущейся жидкости // *Вестник ИГЭУ*. 2014. Вып. 4. С. 53–57.
26. Chernyavskaya A.S., Bobkov S.P. Modeling of heat transfer processes in a moving fluid. *Vestnik of ISEU*. 2014. Iss. 4, pp. 53–57. (In Russian).

УДК 691.17

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-63-71>

А.В. ПЧЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук (pchelaleksandr@mail.ru),

А.П. ПИЧУГИН, д-р техн. наук (gmunsau@mail.ru)

Новосибирский государственный аграрный университет (630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160)

Формирование физико-химической структуры лакокрасочных покрытий при их наномодификации

Рассматриваются вопросы формирования физико-химической структуры лакокрасочных покрытий в результате их модифицирования различными добавками. Обозначено, что повышение эксплуатационных характеристик покрытий обеспечивается за счет сшивания макромолекул полимера и образования сетчатой структуры. Представлены результаты исследования структуры наномодифицированных покрытий; выявлено, что при введении углеродных нанотрубок и оксида висмута не изменяются групповые связи в основе связующего вещества лакокрасочного материала, при этом нанодобавки способствуют переходу макромолекул полимера в растянутое (напряженное) состояние за счет протекания радикального катализа гетерогенного типа, что инициирует полимеризацию лакокрасочного материала, т. е. нанодобавки выступают в качестве структурообразующих центров, провоцируя удлинение полимерных цепей, что способствует образованию большего количества молекулярных связей. При взаимодействии с нанодобавками происходит поверхностная ориентация полярных групп молекул полимера, что усиливает когезионные и адгезионные связи за счет образования усиленного электрвалентного взаимодействия.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, наноразмерные добавки, углеродные нанотрубки, оксид висмута, диоксид кремния, катализатор, сетчатые структуры, полимеризация, электрвалентный обмен, радикальный катализ.

Для цитирования: Пчельников А.В., Пичугин А.П. Формирование физико-химической структуры лакокрасочных покрытий при их наномодификации // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-63-71>

A.V. PCHELNIKOV, Candidate of Sciences (Engineering) (pchelaleksandr@mail.ru), A.P. PICHUGIN, Doctor of Sciences (Engineering) Novosibirsk State Agriculural University (160, Dobroliubova Street, Novosibirsk, 630039, Russian Federation)

Formation of the Physical and Chemical Structure of Paint and Varnish Coatings During Their Nano-Modification

The issues of the formation of the physicochemical structure of paint and varnish coatings as a result of their modification with various additives are considered. It is indicated that an increase in the operational characteristics of coatings is ensured by cross-linking of polymer macromolecules and the formation of a network structure. The results of studying the structure of nano-modified coatings are presented; it was found that the introduction of carbon nanotubes and bismuth oxide does not change the group bonds in the basis of the binder of the paint-varnish material, while nano-additives contribute to the transition of polymer macromolecules to a stretched (stressed) state due to the occurrence of heterogeneous radical catalysis, which initiates the polymerization of the paint-varnish material, i.e. nano-additives act as structure-forming centers, provoking the elongation of polymer chains, which contributes to the formation of more molecular bonds. When interacting with nano-additives, the surface orientation of the polar groups of polymer molecules occurs, which enhances cohesive and adhesive bonds due to the formation of enhanced electrovalent interaction.

Keywords: paint-varnish coating, nanoscale additives, carbon nanotubes, bismuth oxide, silicon dioxide, catalyst, network structures, polymerization, electrovalent exchange, radical catalysis.

For citation: Pchelnikov A.V., Pichugin A.P. Formation of the physical and chemical structure of paint and varnish coatings during their nano-modification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 63–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-63-71>

Для создания лакокрасочных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами необходимо уделять особое внимание образующимся в результате межмакромолекулярным реакциям. Классические лакокрасочные покрытия представляют собой полимеры линейной структуры. За счет протекания межмакромолекулярных реакций возможно соединение исходных линейных полимеров, и как следствие, образование сетчатой структуры [1–7].

В случае взаимодействия между собой разных макромолекул полимера — по функциональным группам или посредством би- и более функциональных низкомолекулярных веществ — возникают химические связи в структурах между разными макромолекулами. В результате создается новая система связанных друг с другом химически макромолекул, которые теряют способность растворяться и необратимо проскальзывать друг относительно друга, т. е.

теряют способность к необратимым пластическим деформациям. Как правило, в образовавшихся при этом сетчатых структурах резко улучшаются механические свойства [3].

Образование сетчатой структуры полимеров, в том числе лакокрасочных покрытий, возможно за счет реакций, протекающих внутри одной макромолекулы, что приводит к образованию циклов в макромолекулах, сильно меняющих структуру и основные свойства как исходных макромолекул, так и сток на их основе [3, 4, 7].

Суть образования сетчатой структуры из исходных молекул полимера — превращение полимера одного качества в другое: исходный полимер характеризуется определенными механическими и другими свойствами и до образования в нем сетчатой структуры. Сетчатая же структура изменяет этот комплекс свойств, повышая механические показатели, устойчи-

чивость к повышенной температуре, действию растворителей, агрессивных сред и др.

Структура сетчатого полимера, образованного путем сшивания его исходных линейных изолированных макромолекул, характеризуется следующим образом (рис. 1). Участок соединения макромолекул поперечными химическими связями называется узлом сетки или поперечной связью. Каждый узел заканчивается двумя сшитыми звеньями двух разных макромолекул полимера. Если размер поперечной связи совпадает с размером элементарного звена макромолекулы полимера, т. е. проявляет себя как жесткое структурное образование, то понятия узла сетки и поперечной связи совпадают. Если же поперечная связь по размеру существенно больше размера элементарного звена и сегмента, то узлами сетки называются сшитые звенья, т. е. число узлов вдвое больше числа поперечных связей [3, 4, 6, 7].

Определяющей характеристикой сетчатой структуры полимера является молекулярная масса или размер участка цепи между двумя сшитыми звеньями (узлами). От размера этих участков зависит проявление свойств индивидуальных макромолекул в сетчатой структуре полимера. Если эти участки значительно больше размеров сегмента макромолекулы, то сетчатый полимер сохранит основные свойства, присущие исходному полимеру, например высокоэластичность, химическую стойкость. Такой сетчатый полимер будет ограниченно набухать в характерных для исходного полимера растворителях. Если же размер участка цепи между сшитыми звеньями (узлами) близок к размеру сегмента или меньше его, то свойства исходного полимера существенно изменяются: резко падает гибкость цепи, а следовательно уменьшаются высокоэластические свойства, снижается или теряется совсем способность к набуханию в растворителях данного полимера.

Известно три способа получения сетчатых структур за счет сшивания исходных макромолекул [3]:

1. Реакции функциональных групп исходных макромолекул друг с другом и реакции низкомолекулярных реагентов, содержащих функциональные группы, по функциональным группам, расположенным вдоль макромолекулярных цепей.

2. Сшивание насыщенных и ненасыщенных полимеров пероксидами и излучениями высоких энергий (пероксидное и радиационное сшивание).

3. Сшивание ненасыщенных эластомеров серой и ускорителями (вулканизация).

При анализе вышеприведенных способов к лакокрасочным покрытиям возможно отнести только первые два, так как третий способ является применимым при производстве резинотехнических изделий.

Первый способ осуществим в том числе за счет модификации лакокрасочных покрытий различными микро- и нанодобавками.

Второй способ получения сетчатой структуры подразумевает применение ускорителей сушки покрытий, в частности излучениями высокой энергии.



Рис. 1. Схема формирования сетчатого полимера

Fig. 1. Scheme of the formation of a network polymer

В случае применения наноразмерных добавок для получения сетчатой структуры лакокрасочных материалов сшивание происходит в основном за счет высокой удельной поверхности наночастиц, которые в данном случае выступают в качестве катализаторов, образующих с молекулой одного из реагентов промежуточное соединение, в котором ослаблены химические связи. Это облегчает его реакцию со вторым реагентом [8–10]. Таким образом, происходит процесс гетерогенного катализа на поверхности твердого тела (наночастиц), в связи с этим активность катализатора зависит от величины и свойств его поверхности. На основании этого механизм взаимодействия наночастиц с материалами может включать в себя пять стадий [8, 9]:

- диффузия реагирующих веществ к поверхности наночастиц;
- физическая адсорбция на активных центрах поверхности наночастиц реагирующих молекул и последующая их хемосорбция;
- химическая реакция между реагирующими молекулами лакокрасочного материала;
- десорбция продуктов с поверхности катализатора;
- диффузия продукта с поверхности катализатора в общий поток.

Таким образом, вышеизложенное указывает на пути реализации возможностей, заложенных в полимерной природе вещества для существенного улучшения физических и механических свойств полимерных материалов. А одним из эффективных способов являются реакции сшивания молекул лакокрасочных покрытий при их наномодификации.

В связи с этим целью исследования являлось изучение физико-химической структуры наномодифицированных лакокрасочных покрытий.

Материалы и методы

Для проведения испытаний использовались эмали, широко распространенные для окрашивания металлоконструкций, а также исследованные в других работах [2, 5, 11–14]. Для модификации лакокрасочных материалов применялся состав с углеродными нанотрубками Matrix-204 и наночастицы оксида висмута, диоксида кремния, диоксида титана отечественных производителей.

Одним из простых и достоверных методов для определения топологической структуры покрытий является метод равновесного набухания, или метод Флори–Ренера, основанный на набухании покрытия

в растворителе, последующей оценке равновесной степени набухания [6].

В соответствии с методикой равновесного набухания образцы подвергались выдержке в растворителе и через равные промежутки времени контролировались изменения параметров массы, толщины, длины и ширины образцов. Испытания продолжались до момента наступления равновесного состояния, когда параметры становились неизменяемыми. Затем равновесная степень набухания определялась по известным формулам [3, 7]. Исходя из теории Флори–Ренера увеличение плотности сетки приводит к уменьшению степени набухания, т. е. чем меньше показатель равновесной степени набухания, тем структура покрытия более сетчатая.

Для определения структурности полимера (степени и характере образовавшихся связей) одним из наиболее информативных способов является ИК-спектметрия, которая позволяет получать точные данные о строении макромолекул полимера, а также о характеристиках межмолекулярных связей [15].

В связи с этим для установления структурно-группового состава образцов лакокрасочных покрытий, модифицированных наноразмерными добавками, и сравнения их по этому признаку, производилось спектроскопическое исследование при помощи ИК-Фурье спектрометра, сопряженного с микроскопом Nicolet iN10 Thermo Scientific. Условия регистрации: диапазон волновых чисел – 4000–400 см^{-1} , разрешение – 2 см^{-1} , количество сканов – 50, регистрация спектров в режиме пропускания с бромистым калием (приставка НПВО).

Исследование линейных размеров элементов структуры микро- и нанорельефа поверхности наномодифицированных покрытий проведено с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) на базе платформы зондовой нанолaborатории ИНТЕГРА Аура компании НТ-МДТ. Для получения изображений использовали полуконтактный (прерывисто-контактный) метод, для повышения добротности колебаний кантилевера и соответственно увеличения чувствительности, надежности и достоверности в измерениях слабых сил между зондом и образцом исследование проводилось в условиях низкого вакуума. Разрешение по вертикали 0,05 нм, латеральное разрешение ~10 нм. По данным АСМ, среднеквадратичная шероховатость такой поверхности не превышала 0,4 нм.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам исследований равновесной степени набухания (рис. 2) определено, что лакокрасочное покрытие, модифицированное наночастицами оксида висмута и углеродными нанотрубками, приобретает более сетчатую структуру по сравнению с покрытием без добавок, которая также зависит от количества вводимых добавок.

При введении оксида висмута в эмаль сетчатость покрытия увеличивалась, о чем свидетельствуют пока-

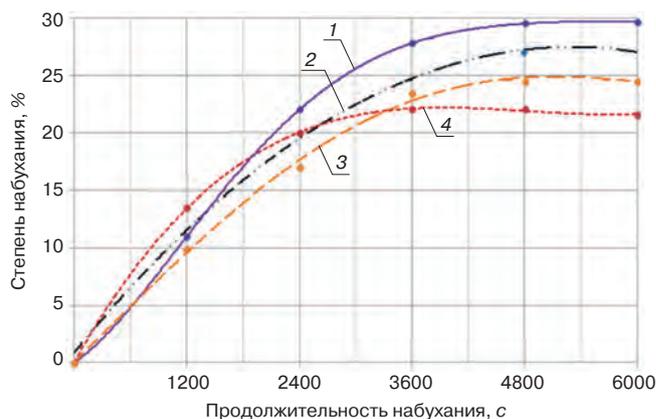


Рис. 2. Степень набухания модифицированных акриловых защитных покрытий в зависимости от продолжительности набухания: 1 – модификация TiO_2 1%; 2 – без модификатора; 3 – модификация Bi_2O_3 1%; 4 – модификация УНТ 0,1%

Fig. 2. The degree of swelling of modified acrylic protective coatings, depending on the duration of swelling: 1 – modification TiO_2 1%; 2 – without modifier; 3 – Bi_2O_3 1% modification; 4 – CNT modification 0,1%

затели объемной равновесной степени набухания, которая уменьшалась с 0,27 до 0,24 при 0,5 и 1% добавки.

Более существенное влияние на образование плотных молекулярных связей оказывало введение в состав УНТ, при этом показатель объемной равновесной степени набухания уменьшался с 0,27 до 0,22 при 0,05% УНТ и до 0,21 при 0,1% УНТ в составе эмали.

Результаты исследований на примере введения нанодобавок в эмаль АК показали, что наномодифицирование приводит к образованию более плотной сетчатой структуры покрытий, которая способствует повышению физико-механических и других свойств (адгезия, истираемость, огнестойкость, химическая стойкость и др.), что и было определено в других исследованиях авторов [2, 5, 11–14].

По результатам ИК-спектроскопии было определено: по общему характеру кривых, числу, положению основных полос поглощения ИК-спектры образцов 1–8 в средней ИК-области проявления колебаний функциональных групп и кратных связей (от 4000 до 1500 см^{-1}) существенных различий не имеют, что свидетельствует о сохранении структурно-группового состава полимерной основы (связующего) лакокрасочного материала при произведенных модификациях с добавлением различных наноразмерных добавок в рамках проведенных исследований (рис. 3). Наличие полос поглощения в области 1730, 1240 см^{-1} свидетельствует, соответственно, о валентных колебаниях $\text{C}=\text{O}$ и $\text{C}-\text{O}$ связей в сложноэфирных группах (акрилаты). Полосы поглощения 3080–3025, 1490, 1450 см^{-1} , а также 760–700 см^{-1} , характерные для сополимера стирола (компонент лакокрасочного материала для химической полимеризации, так как эмаль АК-1301 является двухкомпонентной, при этом: 3080–3025 см^{-1} – валентные колебания CH ароматического кольца; 1490, 1450 см^{-1} – скелетные колебания ароматического кольца; 760, 700 см^{-1} – деформационные колебания CH монозамещенного ароматического кольца. Широкая интенсивная полоса в

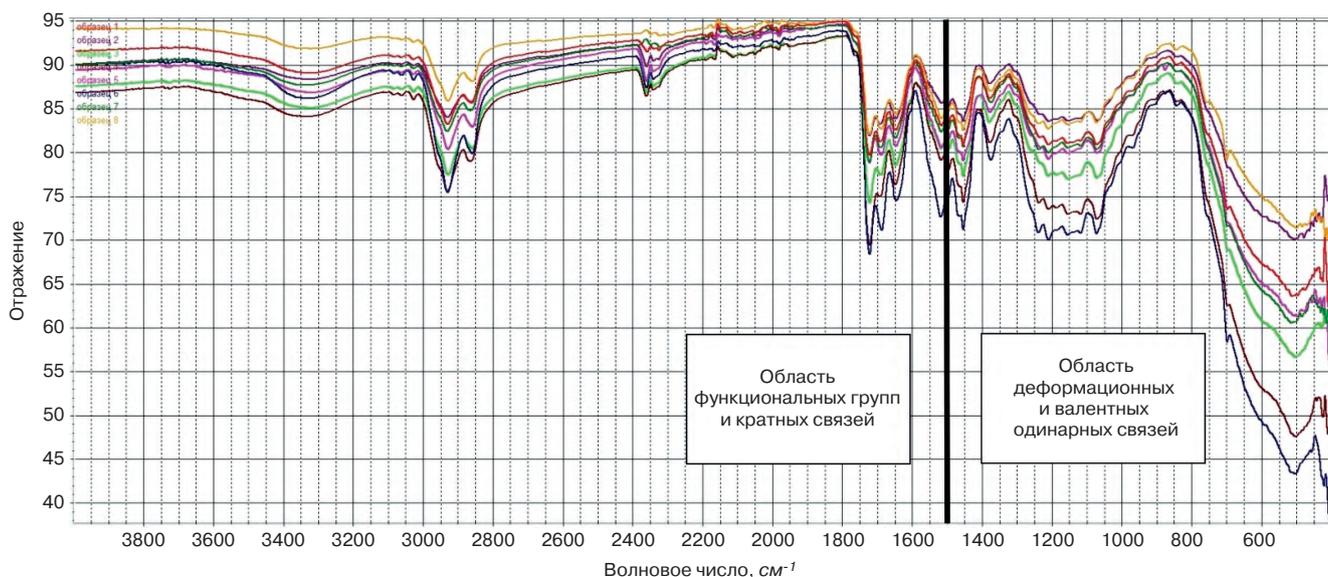


Рис. 3. ИК-спектрометры образцов ЛКП и области ИК-спектрометрии (средняя ИК-область, диапазон 4000–400 cm^{-1}): 1 – без добавок; 2 – состав с УНТ 0,05%; 3 – Состав с УНТ 1%; 4 – диоксид кремния 1%; 5 – диоксид титана 0,5%; 6 – диоксид титана 1%; 7 – оксид висмута 0,5%; 8 – оксид висмута 1%

Рис. 3. IR spectrometers of LCP samples and IR spectrometry regions (mid-IR region, range 4000–400 cm^{-1}): 1 – without additives; 2 – composition with CNT 0.05%; 3 – composition with CNT 1%; 4 – silicon dioxide-1%; 5 – titanium dioxide-0.5%; 6 – titanium dioxide 1%; 7 – bismuth oxide 0.5%; 8 – bismuth oxide 1%

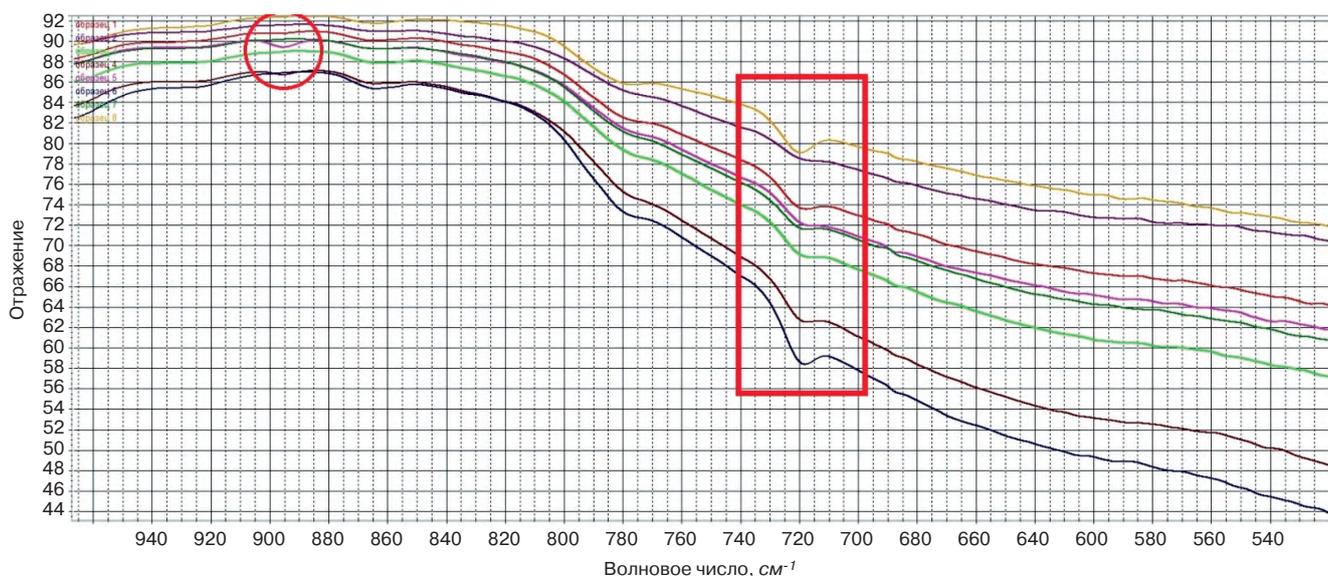


Рис. 4. Волновая область 940–540 cm^{-1} : 1 – без добавок; 2 – состав с УНТ 0,05%; 3 – Состав с УНТ 1%; 4 – диоксид кремния 1%; 5 – диоксид титана 0,5%; 6 – диоксид титана 1%; 7 – оксид висмута 0,5%; 8 – оксид висмута 1%

Fig. 4. Wave region 940–540 cm^{-1} : 1 – without additives; 2 – composition with CNT 0.05%; 3 – composition with CNT 1%; 4 – silicon dioxide-1%; 5 – titanium dioxide-0.5%; 6 – titanium dioxide 1%; 7 – bismuth oxide 0.5%; 8 – bismuth oxide 1%

диапазоне 750–400 cm^{-1} – характерная для поглощения титановых белил (основа пигментной части лакокрасочного материала) [16–18]. Иными словами, ИК-спектры образцов покрытий в области, характеризующей класс соединения, подтверждают, что в исследуемых образцах на основе одного пленкообразующего вещества (акриловая эмаль) и при модификации эмали применены наноразмерные добавки неорганической природы, значительных изменений в связующем веществе не произошло. В связи с тем, что у наномодифицированных покрытий обнаружены различные равновесные степени набухания, свидетельствующие о влиянии наноразмерных модифи-

каторов на структуру покрытий, авторами были рассмотрены ИК-спектры в области деформационных и валентных одинарных связей 1500–400 cm^{-1} (рис. 4, 5). В результате этого установлены различия как по наличию полос поглощения в сравниваемых спектрах, так и по их интенсивности в диапазоне 940–400 cm^{-1} . Отмечено, что в образцах имеет место различие в интенсивности полос деформационных колебаний СН монозамещенного бензольного кольца (760, 700 cm^{-1}), при этом указанные полосы ИК-спектра образцов лакокрасочных покрытий, модифицированных составом с УНТ (линии 2, 3 рис. 4, 5), более интенсивны по отношению к поло-

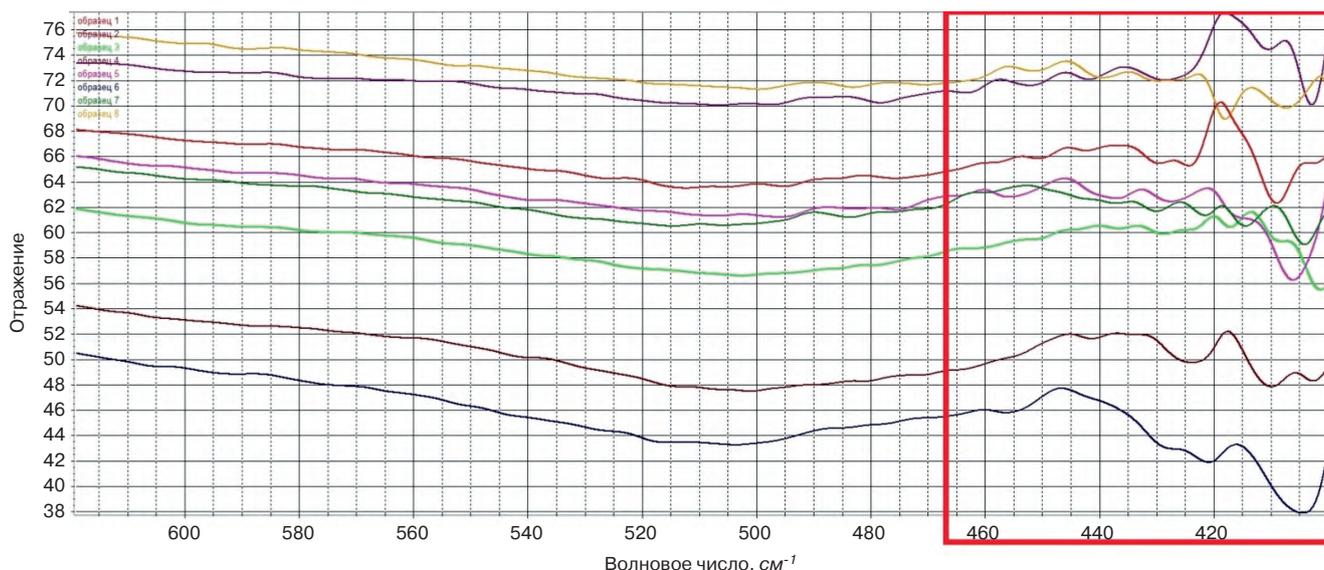


Рис. 5. Волновая область $620\text{--}400\text{ см}^{-1}$: 1 – без добавок; 2 – состав с УНТ 0,05%; 3 – состав с УНТ 1%; 4 – диоксид кремния 1%; 5 – диоксид титана 0,5%; 6 – диоксид титана 1%; 7 – оксид висмута 0,5%; 8 – оксид висмута 1%

Fig. 5. Wave region $620\text{--}400\text{ см}^{-1}$: 1 – without additives; 2 – composition with CNT 0.05%; 3 – composition with CNT 1%; 4 – silicon dioxide-1%; 5 – titanium dioxide-0.5%; 6 – titanium dioxide 1%; 7 – bismuth oxide 0.5%; 8 – bismuth oxide 1%

сам образцов с иными наноразмерными добавками; модифицированные диоксидом титана наименее интенсивны (кривые 5, 6 рис. 4, 5). Аналогичная картина просматривается в области проявления валентных колебаний С–О связей в сложноэфирных группах ($1200\text{--}1240\text{ см}^{-1}$). Обнаруженные изменения полос поглощения в диапазоне от 1500 до 700 см^{-1} характеризуют количество образовавшихся связей при участии пленкообразующего вещества и нанодобавок. Наиболее выраженное различие в ИК-спектрах просматривается в волновой области $450\text{--}400\text{ см}^{-1}$, отражающей соединения минеральной составляющей лакокрасочного покрытия, характеризующей пигментную часть и нанодобавки.

Сканирование различных участков поверхностей образцов лакокрасочных покрытий на атомно-силовом микроскопе показало, что при модификации нанодобавками оксидом висмута и углеродными нанотрубками поверхность становится более гладкой, средняя шероховатость R_a уменьшается с $50\text{--}60\text{ нм}$ (рис. 6, *a*) до $20\text{--}30\text{ нм}$ (рис. 6, *b, c*). Причем более существенное уменьшение выступов наблюдается у покрытий, модифицированных составом с УНТ.

В то же время при совместном введении наночастиц оксида висмута и углеродных нанотрубок количество и величина выступов сводятся к минимуму и параметр R_a уменьшается до $10\text{--}15\text{ нм}$ (рис. 6, *d*), что говорит об усиливающем эффекте при совместном введении и соответственно упрочнении покрытия за счет уменьшения размеров углублений и пор [19].

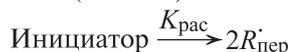
Таким образом, микроструктурный анализ позволил доказать существование оптимального содержания нанодобавок и подтвердить ранее полученный другими методами исследований синергетического эффекта усиления качественных показателей защитного акрилового композита.

Происходящие в целом процессы в лакокрасочном материале при их наномодификации и образовании сетчатой структуры целесообразно обосновывать каталитическим механизмом, а именно процессом гетерогенного катализа на поверхности твердого тела (наночастиц), в связи с этим активность катализатора зависит от величины и свойств его поверхности [10].

В данной работе в качестве базового материала использовалась акриловая эмаль, которая, помимо пигмента, пеногасителей и стабилизаторов, в своей основе состоит из полиакрилатов (преимущественно полимеров метил-, этил- и бутилакрилатов), а также их сополимеров в качестве пленкообразователей. Полиакрилаты – полимеры сложных эфиров акриловой, метакриловой или цианакриловой кислот общей формулы $(-\text{CH}_2-\text{CR}'(\text{COOR})-)_n$ ($\text{R}'=\text{H}$ – акрилаты, $\text{R}'=\text{CH}_3$ – метакрилаты, $\text{R}'=\text{CN}$ – цианакрилаты), термопластичные полимерные материалы, практически наиболее важные представители класса – поли-*n*-алкилакрилаты и полиметилметакрилат. Как известно [1, 4, 6, 7], в полимеризации применяются радикальные, катионные и анионные инициаторы (катализаторы). При этом различные мономеры полимеризуются только в присутствии катализаторов определенного типа, т. е. обладают значительной селективностью по отношению к типу активных центров, вызывающих их полимеризацию. Большинство мономеров полимеризуется под действием радикальных катализаторов, хотя скорость реакции сильно зависит от природы мономера и катализатора. Вместе с тем мономеры очень чувствительны к катализаторам ионного типа: одни не полимеризуются под действием анионных катализаторов, другие – катионных. Для акрилатов и метакрилатов свойственны радикальный и анионный типы катализа. При этом, поскольку в рамках насто-

ящей работы в акриловую эмаль добавляли химически нейтральные нанодобавки, на свойства которых не влияли какие-либо из компонентов самой системы эмали, представляется, что взаимодействие нанодобавок с данными компонентами с формированием структурообразующих центров происходит преимущественно по механизму гетерогенного катализа радикальной полимеризации – цепной реакции, протекающей через образование свободных радикалов [1, 4, 6, 7]. В простейшем случае схема радикальной полимеризации включает три стадии, которым соответствуют элементарные реакции: инициирование (катализ), рост цепи и обрыв цепи. В случае химического катализа эта схема может быть представлена следующим образом [1, 4].

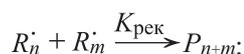
Инициирование (катализ):



Рост цепи:

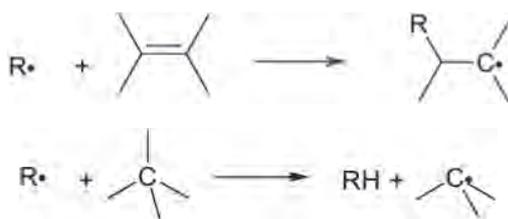


Обрыв цепи:



где $K_{\text{рек}}$, $K_{\text{дис}}$ – константы скорости обрыва путем рекомбинации и диспропорционирования соответственно.

Инициирование (катализ) радикальной полимеризации – процесс образования свободно-радикальных центров R^{\cdot} . Вследствие наличия неспаренных электронов на внешних орбитах они характеризуются электрофильными свойствами, способностью атаковать электронные пары π - и даже σ -связей мономера и превращать его в свободный радикал:



Свободные радикалы могут возникнуть в результате действия на системы физических факторов, а также чисто химическим путем – при гомолитическом распаде соединений с относительно невысокими энергиями связи или в результате протекания окислительно-восстановительных процессов.

В то же время степень полимеризации вещества, которая характеризуется длиной цепей полимера, наряду с его структурными особенностями оказывает значительное влияние на физические свойства полимерных соединений.

Известно, что чем длиннее цепи полимера (длина молекул), тем больше у них точек соприкосновения

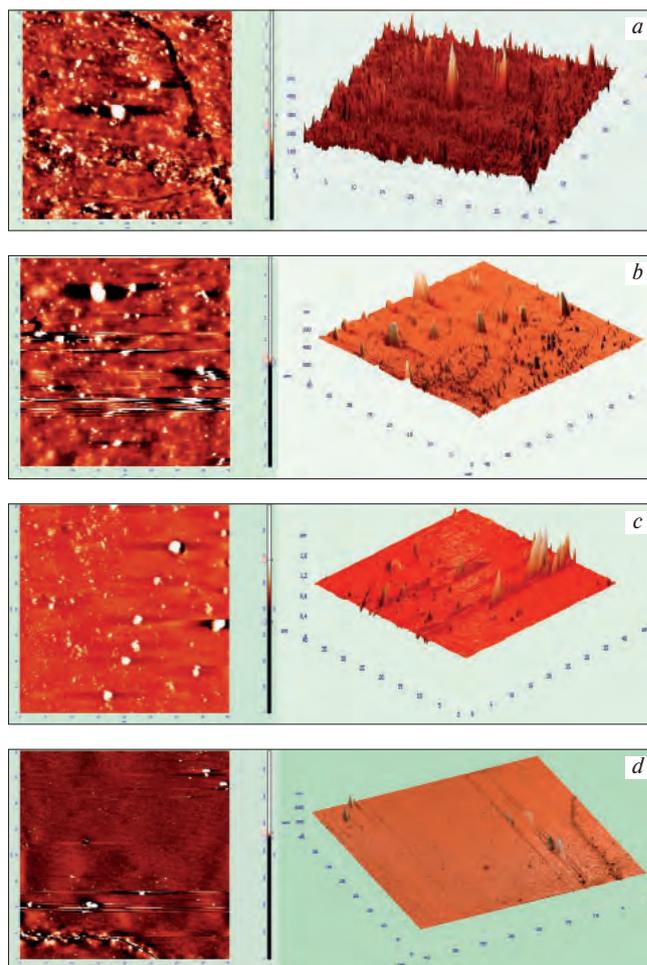


Рис. 6. АСМ изображения наномодифицированных покрытий: а – без добавок; б – оксид висмута 1%; с – состав с УНТ 0,1%; д – оксид висмута 1% + состав с УНТ 0,1%

Рис. 6. AFM images of nanomodified coatings: а – without additives; б – bismuth oxide 1%; с – composition with CNT 0.1%; д – bismuth oxide 1% + composition with CNT 0.1%

(точек контакта) между соседними молекулами и тем большая требуется сила, чтобы разорвать образовавшиеся между цепями связи. Таким образом, когезия будет возрастать по мере увеличения длины молекул. Относительно слабые ван-дер-ваальсовы силы (межмолекулярные силы) при большом количестве точек соприкосновения между соседними цепями могут обусловить суммарную прочность на разрыв, не только равную прочности химических связей, но и значительно превосходящую ее.

При определенной длине молекул полимера, степени их ориентации и плотности укладки возможно, что связи между макромолекулами окажутся прочнее химических электровалентных связей. В данном случае при деформации будут разрываться сами цепи полимера, так как наименее прочным звеном всей системы окажутся цепи главных валентностей. Еще большее удлинение цепей не будет сказываться на прочности полимера ввиду того, что слабым звеном в теле будут оставаться электровалентные связи. Таким образом, помимо межмолекулярного взаимодействия, значительную роль в когезионной проч-

ности полимера играет электровалентное взаимодействие. Усиление межмолекулярных связей в полимере приводит к упрочнению системы. Еще лучший результат достигается при сшивании цепей полимера за счет химического взаимодействия, т. е. образования между цепями электровалентных связей, благодаря чему вся система начинает работать как одно целое, как одна гигантская молекула.

Известно, что предельная длина цепей, обеспечивающая максимальную когезию вещества – разрыв самих цепей или число звеньев в макромолекуле полимера, обеспечивающее наибольшую его прочность (когезию), составляет 600–800 [20]. Эта величина варьируется в зависимости от строения цепей, ее формы, степени параллелизации макромолекул, плотности укладки, степени дисперсности полимера и т. д.

Усиления связей между молекулами возможно добиться за счет введения в полимер веществ, обладающих более высокой адгезией к молекулам полимера по сравнению с когезией самого вещества. Если в полимере со слабыми межмолекулярными связями упрочнить эти связи, возможно получить эффект увеличения прочности материала при растяжении молекул, поскольку станет возможным получение в системе длительного по времени и высокого по величине напряжения. Таким образом, действие добавок сводится к тому, чтобы удержать полимер в напряженном состоянии (в растянутом виде).

Действие добавок в случае каталитического механизма гетерогенного типа эффективно тогда, когда адгезия полимера к введенным частицам значительно выше когезии самого полимера. Чем выше адгезия тел, тем больше возможностей создать в системе высокое напряжение, т. е. растянуть молекулы (путем ориентации цепей) и тем эффективнее будет действие вводимых добавок.

Фиксация напряжения достигается за счет того, что силы адгезии полимера к частицам добавок значительно больше, чем силы сцепления между самими макромолекулами полимера. Другими словами, процесс введения добавок надо рассматривать как процесс, в результате которого полимер переводится в растянутое (напряженное) состояние, в каком он затем и остается после снятия нагрузки.

Если адгезия полимера к частицам модификатора ниже или равна когезионной прочности полимера, такие наполнители не улучшают механические свойства полимера, а иногда, наоборот, даже снижают их.

Исходя из вышеизложенного ниже представлена модель формирования полимерных цепей лакокрасочных покрытий при их наномодификации добавками, обеспечивающими улучшение эксплуатационных характеристик, что и было определено в результате экспериментальных исследований (рис. 7).

При введении нанодобавок макромолекулы полимера переходят в растянутое (напряженное) состояние и их длина увеличивается со значения l до значения L за счет того, что нанодобавки способствуют образованию свободных радикалов. Это вызывает

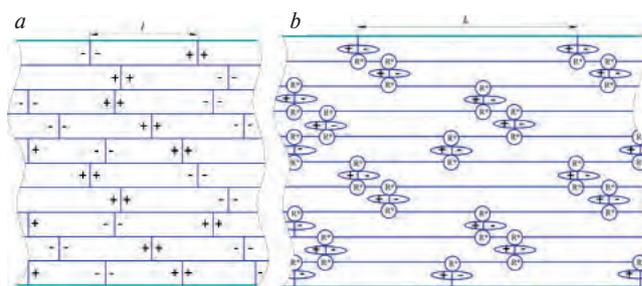


Рис. 7. Схема формирования полимерных цепей лакокрасочных покрытий (R^* – образовавшиеся свободные радикалы, участвующие в роли структурообразующих центров; $\ominus \oplus$ – электровалентная связь между анионами и катионами молекул полимера; l – длина молекул полимера до введения нанодобавок; L – длина молекул полимера в результате введения нанодобавок); a – до введения нанодобавок; b – после введения нанодобавок

Fig. 7. Scheme of the formation of polymer chains of paint coatings (R^* – formed free radicals involved in the role of structure-forming centers; $\ominus \oplus$ – electrovalent bond between anions and cations of polymer molecules; l – length of polymer molecules before the introduction of nanoadditives; L – length of polymer molecules as a result introduction of nanoadditives); a – before the introduction of nanoadditives; b – after the introduction of nanoadditives

протекание радикального катализа гетерогенного типа и инициацию полимеризации лакокрасочного материала; другими словами, нанодобавки выступают в качестве зародышеобразователей (структурообразующих центров), провоцируя удлинение полимерных цепей, что способствует образованию большего количества молекулярных связей.

В то же время, помимо увеличения ван-дер-ваальсового взаимодействия в полимерной системе, ее упрочнение происходит и за счет образования между цепями усиленного электровалентного взаимодействия. В данном случае нанодобавки УНТ и оксида висмута за счет своих индивидуализирующих особенностей (повышенные свойства диамагнетизма, проводящие качества и т. п.) провоцируют поверхностную ориентацию полярных групп молекул полимера [23]. За счет этого происходит поверхностная ориентация диполей полярных групп, т. е. молекулы становятся относительно более ориентированными друг другу. Данный вывод возможно констатировать по результатам испытаний растровой электронной микроскопии и оценки электрических характеристик на аппарате добротности.

Таким образом, когезионная прочность наномодифицированного покрытия увеличивается за счет межмолекулярного и электровалентного взаимодействия.

Электровалентный обмен способствует также увеличению адгезионного взаимодействия. Образование двойного электрического слоя, а также повышенная электрическая проводимость на границе раздела металл–покрытие (выявленного при проведении растровой электронной микроскопии) позволяют говорить об увеличении адгезионного взаимодействия покрытия с металлом за счет электрических сил, что вызвано поверхностной ориентацией нейтральных молекул полимера, содержащих полярные группы.

Вводимые нанодобавки вызывают поверхностную ориентацию полярных групп, ввиду чего повышенное электровалентное взаимодействие наблюдается не

только между молекулами полимера, но и между покрытием и металлом (рис. 8). Таким образом, при контакте покрытия с металлом происходит ориентация поверхностных диполей и поверхность приобретает заряд определенной величины и знака [21].

При установлении контакта полимерных адгезивов с субстратами различной природы на границе раздела возникает двойной электрический слой. Этот процесс развивается в соответствии с описанными механизмами и является следствием химического взаимодействия адгезива и субстрата, образования донорно-акцепторного взаимодействия. В этом случае устанавливается такое распределение электронной плотности, что суммарный эффект приводит к образованию двойного слоя на границе раздела. При отрыве пленки полимера на одной поверхности преобладают положительные заряды, на другой – отрицательные, что и лежит в основе электрической теории адгезии [21].

Это взаимодействие отображено на рис. 8, который наглядно показывает такую ориентацию полярных групп наномодифицированного полимера вблизи поверхности металла, которая провоцирует повышенное взаимодействие катионов и анионов (донорно-акцепторное взаимодействие), вызывающее образование двойного электрического слоя между покрытием и металлом, что влечет за собой появление адгезионных связей электровалентного характера.

Выводы

По результатам исследований установлено, что введенные в лакокрасочный материал нанодобавки неорганической природы в малых количествах не изменяют групповые связи в основе связующего вещества (нерастворимы в полимере) и соответственно не разрушают основу связующего, при этом нанодобавки способствуют переходу макромолекул полимера в растянутое (напряженное) состояние за счет протекания радикального катализа гетерогенного типа, что инициирует полимеризацию лакокрасочного материала, т. е. нанодобавки выступают в качестве зародышеобразователей (структурообразующих центров), провоцируя удлинение полимерных цепей, что способствует образованию большего количества молекулярных связей. Также при взаимодействии с нанодобавками происходит повышение когезион-

Список литературы

1. Багдасарьян Х.С. Теория радикальной полимеризации. М.: Наука, 1966. 300 с.
2. Пчельников А.В., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Илясов А.П. Влияние нанодобавок на повышение адгезионной прочности защитных покрытий к стальным конструкциям и оборудованию // *Известия вузов. Строительство*. 2021. № 7. С. 103–113.
3. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. М.: Высшая школа, 1988. 312 с.

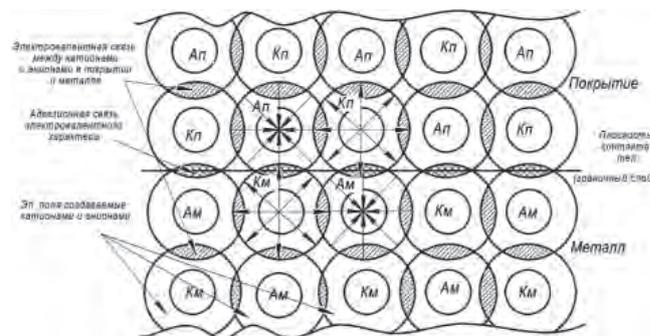


Рис. 8. Схема электровалентных связей при взаимодействии покрытия и подложки

Рис. 8. Scheme of electrovalent bonds during the interaction of the coating and substrate

ных и адгезионных связей за счет образования усиленного электровалентного взаимодействия. Применяемые нанодобавки провоцируют поверхностную ориентацию полярных групп молекул полимера (молекулы становятся более ориентированными друг другу). При бинарном введении нанодобавок оксида висмута и углеродных нанотрубок происходит упрочнение системы (повышение когезии) за счет образования между полимерными цепями усиленного электровалентного взаимодействия, а также повышение адгезионного взаимодействия, за счет увеличения донорно-акцепторных связей между покрытием и металлом. Данные выводы подтверждаются результатами атомно-силовой микроскопии, выраженными в уменьшении количества и величины выступов в покрытии до 10–15 нм, что способствует упрочнению покрытия за счет уменьшения размеров углублений и пор и, как следствие, повышению качественных показателей защитного покрытия.

References

1. Bagdasaryan Kh.S. Teoriya radikal'noi polimerizatsii [Theory of radical polymerization]. Moscow: Nauka. 1966. 300 p.
2. Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P., Khritankov V.F., Ilyasov A.P. Influence of nanoadditives on increasing the adhesion strength of protective coatings to steel structures and equipment. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*. 2021. No. 7, pp. 103–113. (In Russian).
3. Kuleznev V.N., Shershnev V.A. Khimiya i fizika polimerov [Chemistry and physics of polymers]. Moscow: Vysshaya shkola. 1988. 312 p.
4. Moskvitin N.I. Skleivanie polimerov [Bonding of polymers]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'. 1968. 304 p.
5. Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P., Khritankov V.F., Smirnova O.E. The role of nano-additives in the formation of a strong contact layer of protective coatings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 7, pp. 45–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-45-50>
6. Tager A.A. Physical chemistry of polymers [Fiziko-khimiya polimerov]. Moscow: Nauka. 1968. 320 p.

4. Москвитин Н.И. Склеивание полимеров. М.: Лесная промышленность, 1968. 304 с.
5. Пчельников А.В., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е. Роль нанодобавок в формировании прочного контактного слоя защитных покрытий // *Строительные материалы*. 2022. № 7. С. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-45-50>
6. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Наука, 1968. 320 с.
7. Федтке М. Химические реакции полимеров. М.: Химия, 1990. 152 с.
8. Фомина Л.В., Безносюк С.А. Катализ и катализаторы. Барнаул.: АлтГУ, 2014. 208 с.
9. Фурсиков П.В., Тарасов П.В. Каталитический синтез и свойства углеродных нановолокон и нанотрубок // *Альтернативная энергетика и экология*. 2004. № 10. С. 24–40.
10. Шашок Ж.С., Прокопчук Н.Р. Применение углеродных наноматериалов в полимерных композициях. Минск: БГТУ, 2014. 232 с.
11. Пчельников А.В., Пичугин А.П., Луцик Р.В., Ткаченко С.Е. Диэлькометрический анализ эксплуатационных характеристик и процесса старения защитных покрытий // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 1 (16). С. 14–22.
12. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Пчельников А.В., Ромашев Д.В. Защитные свойства композиций с наноразмерными и специальными добавками от радиационного воздействия // *Известия вузов. Строительство*. 2021. № 12 (756). С. 24–33.
13. Пчельников А.В., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Волобой Е.А. Моделирование процесса и способы оценки горения защитных покрытий металлических конструкций и оборудования // *Известия вузов. Строительство*. 2020. № 6 (738). С. 81–90.
14. Илясов А.П., Пчельников А.В., Пичугин А.П., Хританков В.Ф. Теплозащитные свойства полимерных композиций с наноразмерными и специальными добавками // *Известия вузов. Строительство*. 2022. № 3. С. 15–24.
15. Аверко-Антонович Ю.И. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань.: КГТУ, 2002. 604 с.
16. Браун Д., Флойд А., Сейнзбери М. Спектроскопия органических веществ. М.: Мир, 1992. 300 с.
17. Вульфсон Н.С., Заикин В.Г., Микая А.И. Масс-спектрометрия органических соединений. М.: Химия, 1986. 312 с.
18. Порай-Кошиц М.А. Основы структурного анализа химических соединений. М.: Высшая школа, 1989. 192 с.
19. Пичугин А. П., Пчельников А.В., Хританков В.Ф., Туляганов А.К. Оценка эффективности использования нанодобавок в защитных покрытиях // *Строительные материалы*. 2023. № 3. С. 20–26.
20. Сутягин В.М., Бондалетова Л.И. Химия и физика полимеров. Томск.: Изд-во ТПУ, 2003. 208 с.
21. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 352 с.
7. Fedtke M. Khimicheskiye reaktsii polimerov [Chemical reactions of polymers]. Moscow: Khimiya. 1990. 152 p.
8. Fomina L.V., Beznosyuk S.A. Kataliz i katalizatory [Catalysis and catalysts]. Barnaul: AltGU. 2014. 208 p.
9. Fursikov P.V., Tarasov P.V. Catalytic synthesis and properties of carbon nanofibers and nanotubes. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2004. No. 10, pp. 24–40. (In Russian).
10. Shashok Zh.S., Prokopchuk N.R. Primeneniye ugle-rodneykh nanomaterialov v polimernykh kompozitsiyakh [Application of carbon nanomaterials in polymer compositions]. Minsk: BSTU. 2014. 232 p.
11. Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P., Lutsik R.V., Tkachenko S.E. Dielectric analysis of operational characteristics and the aging process of protective coatings. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2022. No. 1 (16), pp. 14–22. (In Russian).
12. Pichugin A.P., Khritankov V.F., Pchel'nikov A.V., Romashev D.V. Protective properties of compositions with nanosized and special additives against radiation exposure. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*. 2021. No. 12 (756), pp. 24–33. (In Russian).
13. Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P., Khritankov V.F., Voloboy E.A. Modeling of the process and methods for assessing the burning of protective coatings of metal structures and equipment. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*. 2020. No. 6 (738), pp. 81–90. (In Russian).
14. Ilyasov A.P., Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P., Khritankov V.F. Heat-shielding properties of polymer compositions with nanosized and special additives. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*. 2022. No. 3, pp. 15–24. (In Russian).
15. Averkо-Antonovich Yu.I. Metody issledovaniya struktury i svoystv polimerov [Methods for studying the structure and properties of polymers]. Kazan: KSTU. 2002. 604 p.
16. Brown D., Floyd A., Sainsbury M. Spektroskopiya organicheskikh veshchestv [Spectroscopy of organic substances]. Moscow: Mir. 1992. 300 p.
17. Vulfson N.S., Zaikin V.G., Mikaya A.I. Mass-spektrometriya organicheskikh soyedineniy [Mass spectrometry of organic compounds]. Moscow: Khimiya. 1986. 312 p.
18. Poray-Koshits M.A. Osnovy strukturnogo analiza khimicheskikh soyedineniy [Fundamentals of structural analysis of chemical compounds]. Moscow: Vysshaya shkola. 1989. 192 p.
19. Pichugin A.P., Pchel'nikov A.V., Khritankov V.F., Tulyaganov A.K. Evaluation of the effectiveness of the use of nano-additives in protective coatings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 3, pp. 20–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-20-26>
20. Sutyagin V.M., Bondaletova L.I. Khimiya i fizika polimerov [Chemistry and physics of polymers]. Tomsk: Publishing House of TPU. 2003. 208 p.
21. Zimon A.D. Adgeziya plenok i pokrytiy [Adhesion of films and coatings]. Moscow: Khimiya. 1977. 352 p.

В.А. ФЕДОРЦОВ¹, инженер (fedorcovap@mail.ru);
С.С. ГЛАДКИН^{2,3}, инженер (соискатель) (gladkinss66@gmail.com);
А.П. ФЕДОРЦОВ¹, канд. техн. наук (fedorcovap@mail.ru);
В.Т. ЕРОФЕЕВ^{2,3}, д-р техн наук (erofeevvt@bk.ru)

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68)

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

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

Улучшение эксплуатационных свойств цементных композитов комплексными добавками

Рассматривается влияние комплексных добавок на прочность и стойкость цементных композитов в условиях воздействия внешней среды. В исследовании использованы две добавки: ПФМ-НЛК заводского изготовления, представляющая собой смесь суперпластификатора с добавлением воздухововлекающего и гидрофобизирующего комплекса; комплексная добавка – смесь суперпластификатора, тетрабората натрия и борной кислоты. Общим для добавок является содержание суперпластификатора. Он позволяет уменьшить В/Ц смеси и тем самым повысить плотность, прочность, морозостойкость и коррозионную стойкость композита. Гидрофобизирующие и воздухововлекающие комплексы ПФМ-НЛК дополнительно способствуют образованию структуры материала с повышенной морозостойкостью. Борная кислота и тетраборат натрия образуют боратную буферную систему, приводящую к смягчению «химического удара», и тем самым дополнительно повышают коррозионную стойкость. В результате проведенных исследований выявлена эффективность комплексных добавок и подтверждена закономерность, что если каждый фактор в отдельности способствует улучшению свойства, то при совместном их действии эффект становится больше. Составляющие ПФМ-НЛК при совместном действии способствуют получению структуры материала с высокой морозостойкостью. Добавка, содержащая гиперпластификатор, борную кислоту и тетраборат натрия, приводит к повышению прочности и кислотостойкости.

Ключевые слова: цементный композит, предел прочности, коррозия, активные добавки, минеральные добавки, комплексные добавки, суперпластификатор, буферные системы, твердение, нормальные условия, коррозионная стойкость.

Для цитирования: Федорцов В.А., Gladkin С.С., Федорцов А.П., Ерофеев В.Т. Улучшение эксплуатационных свойств цементных композитов комплексными добавками // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 72–79.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-72-79>

V.A. FEDORTSOV¹, Engineer (fedorcovap@mail.ru);
S.S. GLADKIN^{2,3}, Engineer (gladkinss66@gmail.com);
A.P. FEDORTSOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (fedorcovap@mail.ru);
V.T. EROFEEV^{2,3}, Doctor of Sciences (Engineering) (erofeevvt@bk.ru)

¹ National Research Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya Street, Saransk, 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation)

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

³ Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy architecture and construction sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

Improving the Performance Properties of Cement Composites with Complex Additives

The influence of complex additives on the strength and durability of cement composites under environmental conditions is considered. The PFM-NLK additive of factory manufacture is a mixture of a superplasticizer with the addition of an air-entrapping and hydrophobic complex. The second complex additive contained a superplasticizer, sodium tetraborate and boric acid. The content of the superplasticizer is common for additives. It allows you to reduce the I/C of the mixture and thereby increase the density and strength of the composite, and accordingly its frost resistance and corrosion resistance. Hydrophobic and air-entrapping PFM-NLK complexes additionally contribute to the formation of a material structure with increased frost resistance. Boric acid and sodium tetraborate form a borate buffer system, which leads to a softening of the "chemical shock" and thereby further increase corrosion resistance. As a result of the conducted studies, the effectiveness of complex additives was revealed and the regularity was confirmed that if each factor individually contributes to the improvement of the property, then with their combined action the effect becomes greater. The components of PFM-NLC, when combined, contribute to obtaining a material structure with high frost resistance. An additive containing a hyperplasticizer, boric acid and sodium tetraborate leads to an increase in strength and acid resistance.

Keywords: cement composite, tensile strength, corrosion, active additives, mineral additives, complex additives, superplasticizer, buffer systems, hardening, normal conditions, corrosion resistance.

For citation: Fedortsov V.A., Gladkin S.S., Fedortsov A.P., Erofeev V.T. Improving the Performance Properties of cement composites to environmental influences with complex additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 8, pp. 72–79. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-72-79>

Получение эффективных цементных композитов в настоящее время неразрывно связано с введением в их составы добавок, благодаря которым получают высокопрочные, морозостойкие и коррозионно-стойкие цементные бетоны [1–13]. Добавки широко используют для получения специальных бетонов [14–18]. В настоящее время к цементным бетонам часто предъявляются требования, которые сложно выполнить без применения добавок. Они позволяют экономить материалы и энергетические ресурсы в технологии бетонов [19, 20].

Добавки могут иметь один или несколько физико-химических механизмов взаимодействия с внутренней и внешней средами материала. Добавка, имеющая несколько механизмов взаимодействия, как правило, содержит несколько веществ (комплексная добавка), каждое из которых направлено на обеспечение конкретного свойства бетонной смеси и/или бетона. Очевидно, что действие комплексной добавки может быть направлено на эффективное обеспечение отдельного свойства или свойств материала. При этом принимается во внимание, что если каждый фактор в отдельности способствует улучшению свойства, то при совместном их действии эффект становится больше [12].

Введенные в материал в небольшом количестве вещества с направленными механизмами физико-химического взаимодействия будут относиться к активным добавкам. Согласно работе [12] активной добавкой следует называть вещество, которое вводится в состав системы и активно взаимодействует с элементами внутренней и внешней среды или только с элементами одной из них, видоизменяя состав, структуру и свойства системы в зависимости от направленности действия. Широкое применение нашли активные минеральные добавки, содержащие аморфный кремнезем, и в некоторых случаях другие соединения (активные глинозем и алюмосиликаты и т. д.), которые связывают наиболее реакционно-способное составляющее цементного теста (камня) – гидроксид кальция, предотвращая его вымывание и тем самым предохраняя цементный камень от деструкции [18, 21, 22].

Другой разновидностью активных добавок являются вещества, которые вводят в цементные системы с целью взаимодействия с агрессивными средами и уменьшения в этой связи их воздействия на материал [12, 13, 23, 24]. Одни из них малорастворимы и остаются в объеме материала без движения, другие водорастворимы и могут выходить к поверхности композитов и вступать в реакции с проникающими средами. Добавки второго вида могут эффективно защищать границы активного материала, каким являются цементные композиты, при действии на него водосодержащих сред и проникновении воды с опережением, если выполняются следующие условия [13]:

– в структуре материала должны присутствовать растворимая добавка и растворитель (вода);

– природа добавки, состав и строение материала должны обеспечить быстрое ее растворение и заполнение структуры поверхностных слоев;

– количество переносимого активного вещества добавки в единицу времени через защищаемую поверхность в эквивалентном соотношении должно быть не менее количества переносимого в это же время агрессивного компонента среды:

$$D_{\text{Э,д}} k_3 \frac{\partial c}{\partial x} \cdot ds dt \geq D_{\text{Э,А}} \cdot \frac{\partial c_A}{\partial x_A} \cdot ds_A dt, \quad (1)$$

где $D_{\text{Э,д}} k_3 \frac{\partial c}{\partial x} \cdot ds dt$ – количество активного вещества, переносимого за время dt через единицу поверхности изделия ds , не подвергнутой коррозии и нормальной к оси x ; $D_{\text{Э,А}} \cdot \frac{\partial c_A}{\partial x_A} \cdot ds_A dt$ – то же агрессивной среды через единицу внутренней поверхности ds_A слоя, подвергнутого коррозии; c и c_A – концентрация соответственно активного вещества и агрессивной среды в точках x и x_A в момент времени t ; $D_{\text{Э,д}}$ и $D_{\text{Э,А}}$ – эффективные коэффициенты диффузии соответственно активного вещества добавки и агрессивной среды; k_3 – коэффициент эквивалентности.

В пронизываемых композитах выполнение условия (1) не может быть длительным, поскольку происходит быстрое снижение градиента концентрации добавки из-за ее расхода на границе соприкосновения фронтов вследствие химической реакции с компонентами агрессивной среды и последующего вымывания продуктов взаимодействия. Очевидно, что повышение плотности цементного композита будет способствовать повышению его прочности и коррозионной стойкости. Одним из основных способов повышения плотности цементного материала при обеспечении необходимой подвижности смеси является введение в ее состав пластифицирующих добавок, в том числе суперпластификаторов.

В работе [25] приводятся исследования по применению комплексных активных добавок для защиты цементных композитов от воздействия растворов серной кислоты слабой концентрации. В состав добавки входили: карбонат бария (BaCO_3), при взаимодействии которого с растворами серной кислоты образуется без изменения объема нерастворимый, уплотняющий поверхностные слои сульфат бария (BaSO_4), а также смеси, состоящие из слабой кислоты и ее соли, образующие буферные системы, способные смягчать «химический удар» по материалу. При этом составляющие буферных систем хорошо растворимы, могут выходить на поверхность материала и при выполнении условия (1) замедлять его разрушение.

Введение активных комплексных добавок в составы цементных композитов привело к повышению их коррозионной стойкости. Так, коэффициенты стойкости композитов с данными добавками в 1,5–2 раза больше по сравнению с бездобавочным материалом. Причем, согласно [25], данная тенденция характерна как для прочности при сжатии, так и для прочности при изгибе.

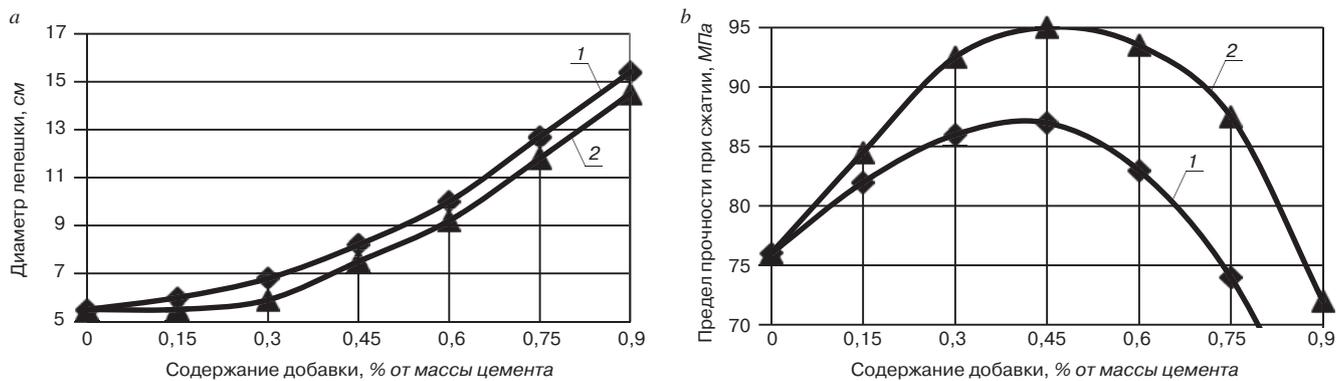


Рис. 1. Влияние содержания комплексной добавки ПФМ-НЛК в сравнении с влиянием пластификатора С-3 на: а – растекаемость цементного теста в сравнении с влиянием гиперпластификатора С-3; б – предел прочности при сжатии цементного камня: 1 – цементное тесто с ПФМ-НЛК; 2 – то же с С-3

Fig. 1. The effect of the content of the complex additive PFM-NLC in comparison with the effect of the C-3 plasticizer on: a – the spreadability of the cement dough in comparison with the effect of the C-3 hyperplasticizer; b – the compressive strength of the cement stone: 1 – cement dough with PFM-NLC; 2 – the same with C-3

Таблица 1
Table 1

Составы цементных смесей
Compositions of cement mixtures

№ состава	Содержание цемента, %	Водоцементное отношение	Количество добавки, % от массы цемента		
			Борная кислота	Тетраборат натрия	Суперпластификатор
1	100	0,34	0,1	0,1	0,7
2	100	0,34	0	0	0,7
3	100	0,42	0	0	0
4	100	0,42	0,1	0,1	0

Метод

Исследованы цементные материалы с добавками и без добавок. Для изготовления цементного камня применяли портландцемент М500Д0 Алексеевского цементного завода Республики Мордовия, содержащий трехкальциевый алюминат в пределах 6–8%. Такое содержание этого минерала соответствует требованиям, предъявляемым к вяжущему веществу при получении цементного бетона повышенной морозостойкости.

Добавка ПФМ-НЛК была применена при изготовлении цементного камня и цементных бетонов. Она представляет собой смесь суперпластификатора (натриевые соли полиметиленафталинсульфонатов различной молекулярной массы) с добавлением воздухововлекающего и гидрофобизирующего комплексов. Цементный камень получали из теста с В/Ц=0,25. Введение ПФМ-НЛК в составы преследовало цель повысить подвижность и гидрофобность смеси, обеспечить необходимое воздухововлечение и тем самым в дальнейшем изготовить плотные, прочные и морозостойкие бетоны. Подвижность цементного теста определялась вискозиметром Суттарда.

Прочность цементного камня оценивалась испытанием образцов размером 20×20×20 мм, твердевших в нормальных условиях (t=20°, W=95–100%), а прочность и морозостойкость бетона – путем испытания

образцов размером 100×100×100 мм, отвержденных пропаркой и в нормальных условиях. При этом морозостойкость определялась ускоренным способом по ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости».

Комплексная добавка CemPlast содержала суперпластификатор (полиметиленафталинсульфонат натрия модифицированный), борную кислоту (H₃BO₃), тетраборат натрия (Na₂B₄O₇·10H₂O) (табл. 1). Очевидно, что цементный камень, полученный из смеси с большим водоцементным отношением, будет характеризоваться и большей пористостью.

Для проведения исследований были изготовлены образцы цементного камня размером 20×20×20 мм с комплексной добавкой, с отдельными ее составляющими и без добавки согласно табл. 1. Отверждение цементного камня происходило в нормальных условиях. Затем образцы погружали в 2% раствор серной кислоты, который меняли через каждые две недели выдержки, и после определенного времени воздействия агрессивной среды испытывали на прочность при сжатии и определяли коэффициент стойкости. Показатели кислотостойкости цементного камня с комплексной добавкой сравнивали с подобными показателями бездобавочного материала и содержащего лишь одну из составляющих добавки, отвержденных и испытанных таким же образом.

Таблица 2
Table 2Составы цементных бетонных смесей для получения бетонов высокой прочности и морозостойкости
Compositions of cement concrete mixtures for obtaining concretes of high strength and frost resistance

№ п/п	Расход исходных материалов на 1 м ³ смеси, кг					
	Портландцемент	Щебень гранитный	Песок кварцевый	Вода	Добавка ПФМ-НЛК	Водоцементное отношение
1	515	1250	521	185	3,6	0,36
2	515	1211	547	175	4,12	0,34
3	515	1211	560	170	4,12	0,33
4	515	1190	567	175	4,12	0,34
5	515	1211	495	195	3,6	0,38

Таблица 3
Table 3Подвижность смесей, условия твердения и технические характеристики бетонов
Mobility of mixtures, hardening conditions and technical characteristics of concrete

№ п/п	Подвижность смеси, см	Условия твердения	Технические характеристики бетона		
			Средняя плотность (γ), кг/м ³	Предел прочности при сжатии (σ_0), МПа	Морозостойкость (F_0), циклы
1	14–16	Нормальные условия	2500	60,7	–
2	12–15	Пропарка	2467	58,4	550
3	10–12	Пропарка	2475	51,9	500
4	11–14	Нормальные условия	2480	50,8	–
5	25–28	Нормальные условия	2420	52,9	–

Результаты и обсуждение

Результаты исследования влияния комплексной добавки ПФМ-НЛК на подвижность смеси, прочность цементного камня и технические характеристики бетонов, в том числе и на морозостойкость, приведены на рис. 1 и табл. 3. На рис. 2–3 показаны результаты исследования влияния комплексной добавки CemPlast на изменение начальной прочности и коэффициента кислотостойкости цементного камня при выдержке в 2% H₂SO₄.

Видно, что с увеличением содержания добавки ПФМ-НЛК подвижность цементной смеси возрастает. Однако при содержании добавки более 0,8% от массы цемента наблюдаются значительные потери первоначальной прочности. В этой связи был сделан вывод, что оптимальным содержанием добавки в бетонной смеси должно быть 0,8% от массы цемента. При таком ее количестве бетонная смесь приобретает необходимую подвижность и достаточный объем воздухововлеченных пор (3–4% общего объема бетона), который позволяет, по данным научной литературы [26], существенно повысить морозостойкость бетона. Образующиеся в этом случае в структуре материала мелкие равномерно распределенные замкнутые поры-сфероиды играют роль буферов, смягчающих отрицательное действие внутреннего давления, развивающегося в бетоне при образовании в порах льда. А поры-

сфероиды, частично сообщающиеся с капиллярами, являются запасными емкостями, в которые выдавливается вода при ее расширении во время перехода в лед.

В табл. 2 представлены составы смесей, а в табл. 3 их подвижность и технические характеристики бетонов, отвержденных в нормальных условиях ($t=20\pm 2^\circ$; $W=95-100\%$) и пропаркой.

Очевидно, что применение комплексной добавки в бетоны, содержащей пластифицирующее, воздухововлекающее и гидрофобизирующее вещества, позволяет получить материалы высокой прочности и морозостойкости. Уменьшение подвижности смеси сверх предельной приводит к уменьшению воздухововлечения, а соответственно и морозостойкости. Очевидно также, что в данном случае составляющие комплексной добавки способствуют созданию такой структуры материала, которая физически препятствует его разрушению при насыщении водой, замерзании и оттаивании.

В отличие от ПФМ-НЛК комплексная добавка CemPlast содержит химически активную к агрессивной среде составляющую. Действие агрессивной среды на материал ослабляется в результате уменьшения проницаемости из-за повышения плотности структуры и взаимодействия среды с активной водорастворимой добавкой. Эффективность добавки возрастает, поскольку имеет место совмещение двух факто-

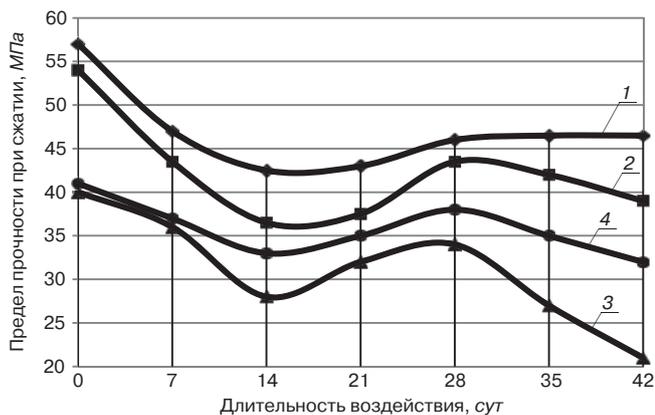


Рис. 2. Влияние добавок на изменение прочности цементного камня при выдержке в 2% серной кислоте (номера составов 1–4 по табл. 1)
Fig. 2. The effect of additives on the change in the strength of cement stone when aged in 2% sulfuric acid (composition numbers 1–4 according to Table 1)

ров, направленных на повышение коррозионной стойкости материала (рис. 2, 3).

На рис. 2 видно, что цементный камень с комплексной добавкой, содержащей борную кислоту, тетраборат натрия и суперпластификатор (табл. 1), имеет более высокую прочность при воздействии 2% серной кислоты. Кроме того, цементный камень этого состава в течение последних двух недель выдержки не теряет прочности в агрессивной среде.

Цементный камень состава 2, содержащий в качестве добавки лишь суперпластификатор, при одинаковой подвижности с другими составами имеет начальную прочность, близкую к прочности материала с комплексной добавкой. Однако наряду с бездобавочным цементным камнем он отличается быстрой потерей прочности в первые две недели выдержки в агрессивной среде. Эти потери больше, чем в конце выдержки. В отличие от цементного камня с комплексной добавкой стабилизации прочности в конце выдержки не наблюдается, что свидетельствует о позитивном влиянии на кислотостойкость добавок, образующих боратную буферную систему.

Влияние добавки борной кислоты и тетрабората натрия наблюдается и в отсутствие в составе гиперпластификатора (рис. 3, состав 4). Однако цементный камень состава 4 изначально значительно отличается по прочности от составов 1 и 2 (рис. 3). Можно также предположить, что из-за более высокого В/Ц, а соответственно высокой пористости по сравнению с цементным камнем состава 1 происходит быстрый расход добавок боратной буферной системы, что приводит к незатухающей потере прочности в конце выдержки (рис. 2, 3).

Таким образом, очевидно влияние комплексной добавки, содержащей боратную буферную систему и суперпластификатор, на повышение прочности и коррозионной стойкости цементного камня. Приведем предпосылки применения и физико-химические особенности действия составляющих комплексной добавки. Если агрессивная среда частично

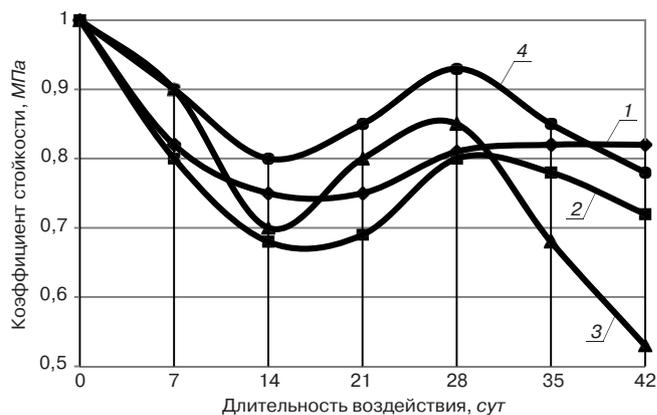


Рис. 3. Влияние добавок на изменение коэффициента стойкости цементного камня при выдержке в 2% серной кислоте (номера составов 1–4 по табл. 1)
Fig. 3. The effect of additives on the change in the coefficient of resistance of cement stone when aged in 2% sulfuric acid (composition numbers 1–4 according to Table 1)

или полностью связывается введенными добавками, то ее количество, находящееся в контакте со структурообразующими компонентами композита, в различной степени будет уменьшаться, что равносильно уменьшению проницаемости. Применительно к композиту с активными добавками можем записать [13]:

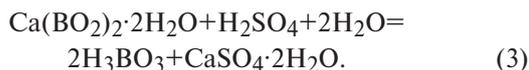
$$V_x + V_c \leq V_n, \quad (2)$$

где V_x – скорость химического взаимодействия; V_n – скорость проникновения среды; V_c – скорость связывания проникающего вещества добавками.

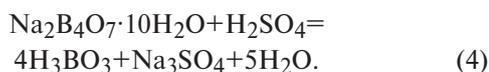
При $V_c = V_n$ скорость химического взаимодействия агрессивной среды со структурообразующими составляющими материала равна нулю, т. е. $V_x = 0$. Очевидно, что активные добавки будут являться эффективными при малой проницаемости материала, т. е. при большой его плотности. В этом случае время расхода активного вещества добавки возрастает, а соответственно и более длительно выполняется условие (1), когда количество переносимого активного вещества добавки в эквивалентном соотношении не меньше переносимого компонента агрессивной среды. В противном случае, т. е. при пористой структуре материала, добавки быстро расходуются при взаимодействии с агрессивными средами.

В нашем случае борная кислота (H_3BO_3) и тетраборат натрия ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ (бура) водорастворимы, и, согласно [27, 28], при совмещении образуют буферные системы, которые способствуют сохранению pH среды, а соответственно материала при действии на него агрессивных сред. При введении в цементные смеси эти вещества взаимодействуют с составляющими цементного вяжущего. Так, согласно [27], борная кислота реагирует с образованием боратов кальция общей формулы $Ca(BO_2)_2 \cdot nH_2O$. Тетраборат натрия в зависимости от условий отвердевания и эксплуатации цементных композитов, их возраста может находиться в свободном, связанном или частично связанном состоянии с образованием боратов кальция, и в частности тетраборатов.

При действии на цементный камень 2% H_2SO_4 на его поверхности происходит взаимодействие с образованием обеих составляющих буферной системы [13]. Например, при взаимодействии $Ca(BO_2)_2 \cdot 2H_2O$ с раствором H_2SO_4 образуется борная кислота согласно уравнению:



Тетраборат натрия может поставляться непосредственно составляющими материала, если он содержится в них в свободном виде, или образовываться при взаимодействии продукта реакции (3) – борной кислоты с едкими щелочами цементного камня. В свою очередь, тетраборат натрия взаимодействует с раствором серной кислоты, ослабляя ее воздействие, по уравнению:



При этом, согласно [24], изменение рН внутренней среды идет медленнее, чем если бы реакция проходила в отсутствие составляющих боратной буферной системы. В этой связи будет замедляться и процесс коррозии цементного камня. Необходимые составляющие буферной системы образуются в поверхностных слоях, являются следствием взаимодействия и находятся в растворенном состоянии.

Растворение объясняется тем, что раствор серной кислоты образуется из двух веществ, одно из которых, кислота, расходуется на поверхности, а второе, вода, проникает с опережением в поверхностные слои материала и подвергает растворению составляющие буферной системы на внутренней границе зоны взаимодействия. Таким образом, на границе взаимодействия материала с агрессивной средой

протекают процессы, обусловленные наличием активных веществ добавки, которые ослабляют агрессивность среды и способствуют повышению коррозионной стойкости бетонного камня.

Выводы

1. Приведена особенность комплексных добавок эффективно обеспечивать технические свойства цементных композитов. Эта особенность состоит в том, что если каждый фактор, в том числе и добавка с направленным действием, в отдельности способствует улучшению свойства, то при совместном их действии эффект становится больше.

2. Приведены теоретические предпосылки повышения коррозионной стойкости цементного камня путем введения комплексной добавки, состоящей из суперпластификатора и активных к агрессивной среде веществ, образующих боратную буферную систему.

3. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают эффективность комплексной добавки ПФМ-НЛК, способствующей созданию такой структуры материала, которая физически препятствует его разрушению при насыщении водой, замораживании-оттаивании и позволяет получить цементные композиты высокой прочности и морозостойкости.

4. Комплексная добавка, содержащая суперпластификатор и боратную буферную систему, способствует получению не только плотной структуры, но и дополнительно ослабляет агрессивную среду в результате активного взаимодействия с ней. Добавка способствовала при равной подвижности цементных смесей повышению предела прочности при сжатии отвержденного камня на 40%, коэффициента стойкости в 1,5 раза по сравнению с материалом без добавки.

Список литературы

1. Калашников В.И., Володин В.М., Мороз М.Н. и др. Супер и гиперпластификаторы. Микрокремнезема. Бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // *Молодой ученый*. 2014. № 19 (78). С. 201–210.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона // *Бетон и железобетон*. 1992. № 7. С. 4–7.
3. Гуляев Е.В., Ерофеева И.В., Калашников В.И. [и др.]. Влияние реакционно-активных добавок на прочностные свойства пластифицированного цементного камня // *Молодой ученый*. 2014. № 19. С. 194–196.
4. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept // *Solid State*

References

1. Kalashnikov V.I., Volodin V.M., Moroz M.N. [et al.] Super and hyperplasticizers. Microsilica. New generation concretes with low specific cement consumption per unit strength. *Molodoj Uchenyj*. 2014. No. 19 (78), pp. 201–210. (In Russian).
2. Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Krivoborodov Yu.R. Influence of cement stone structure with additives of micro-silica and superplasticizer on concrete properties. *Beton i Zhelezobeton*. 1992. No. 7, pp. 4–7. (In Russian).
3. Gulyaev E.V., Erofeeva I.V., Kalashnikov V.I. [et al.] Influence of reaction-active additives on the strength properties of plasticized cement stone. *Molodoj Uchenyj*. 2014. No. 19, pp. 194–196. (In Russian).
4. Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept. *Solid State Phenomena*. 2016. 871, pp. 96–103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.96

- Phenomena*. 2016. 871, pp. 96–103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.96
5. Русаков К.В., Федорцов А.П. Разработка морозостойкого цементного бетона для конструкций с повышенными техническими требованиями. *Актуальные вопросы архитектуры и строительства: Материалы Международной научно-технической конференции*. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 107–109.
 6. Janfeshan Araghi H., Nikbin I.M., Rahimi Reskati S., Rahmani E., Allahyari H. An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77, pp. 461–471. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.037
 7. Vishwakarma V., George R.P., Ramachandran D., Anandkumar B., Mudali U.K. Studies of detailed biofilm characterization on fly ash concrete in comparison with normal and superplasticizer concrete in seawater environments // *Environmental Technology*. 2014. Vol. 35. Iss. 1, pp. 42–51. DOI: 10.1080/09593330.2013.808249
 8. Ramachandran D., George R.P., Vishwakarma V., Kamachi Mudali U. Strength and durability studies of fly ash concrete in sea water environments compared with normal and superplasticizer concrete // *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 21, Iss. 4, pp. 1282–1290. DOI: 10.1007/s12205-016-0272-4
 9. Noeiaghahi T., Dhami N., Mukherjee A. Nanoparticles surface treatment on cemented materials for inhibition of bacterial growth // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 150, pp. 880–891. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.046
 10. Volpi E., Foidadelli C., Trasatti S., Koleva D.A. Development of Smart Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete Structures Exposed to a Microbial Environment // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56. Iss. 20, pp. 5778–5794. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b00127.
 11. Strigác J., Martauz P. Fungistatic properties of granulated blastfurnace slag and related slagcontaining cements // *Ceramics – Silikaty*. 2016. Vol. 60. Iss. 1, pp. 19–26. DOI: 10.13168/cs.2016.0003
 12. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Федорцов В.А. Повышение коррозионной стойкости цементных композитов активными добавками // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 51–60.
 13. Федорцов А.П. Физико-химическое сопротивление строительных композитов и способы его повышения. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 464 с.
 14. Чернышев Е.М., Коротких Д.Н., Артамонова О.В. Нанотехнологические условия управления структурообразованием высокопрочных цементных бетонов // *Труды центрального регионального отделения РААСН*. 2010. С. 102–123.
 5. Rusakov K.V., Fedortsov A.P. Development of frost-resistant cement concrete for structures with increased technical requirements. *Actual issues of architecture and construction: proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2014, pp. 107–109.
 6. Janfeshan Araghi H., Nikbin I.M., Rahimi Reskati S., Rahmani E., Allahyari H. An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77, pp. 461–471. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.037
 7. Vishwakarma V., George R.P., Ramachandran D., Anandkumar B., Mudali U.K. Studies of detailed biofilm characterization on fly ash concrete in comparison with normal and superplasticizer concrete in seawater environments. *Environmental Technology*. 2014. Vol. 35. Iss. 1, pp. 42–51. DOI: 10.1080/09593330.2013.808249
 8. Ramachandran D., George R.P., Vishwakarma V., Kamachi Mudali U. Strength and durability studies of fly ash concrete in sea water environments compared with normal and superplasticizer concrete. *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 21, Iss. 4, pp. 1282–1290. DOI: 10.1007/s12205-016-0272-4
 9. Noeiaghahi T., Dhami N., Mukherjee A. Nanoparticles surface treatment on cemented materials for inhibition of bacterial growth. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 150, pp. 880–891. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.046
 10. Volpi E., Foidadelli C., Trasatti S., Koleva D.A. Development of smart corrosion inhibitors for reinforced concrete structures exposed to a microbial environment. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56. Iss. 20, pp. 5778–5794. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b00127.
 11. Strigác J., Martauz P. Fungistatic properties of granulated blastfurnace slag and related slagcontaining cements. *Ceramics–Silikaty*. 2016. Vol. 60. Iss. 1, pp. 19–26. DOI: 10.13168/cs.2016.0003
 12. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Fedortsov V.A. Increase of corrosion resistance of cement composites by active additives. *Stroitel'stvo i Rekonstrukcija*. 2020. No. 2 (88), pp. 51–60. (In Russian).
 13. Fedortsov A.P. Fiziko-himicheskoe soprotivlenie stroitel'nyh kompozitov i sposoby ego povysheniya [Physico-chemical resistance of building composites and ways to increase it]. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2015. 464 p.
 14. Chernyshev E.M., Korotkikh D.N., Artamonova O.V. Nanotechnological conditions for controlling the structure formation of high-strength cement concrete. *Trudy central'nogo regional'nogo otdelenija RAASN*. 2010, pp. 102–123. (In Russian).
 15. Dvorkin L.I., Shabman I.B., Chudnovsky S.M., et al. High-strength concrete with the use of fly ash. *Beton i Zhelezobeton*. 1993. No. 1, pp. 23–25. (In Russian).

15. Дворкин Л.И., Шабман И.Б., Чудновский С.М. и др. Высокопрочные бетоны с применением золы-уноса // *Бетон и железобетон*. 1993. № 1. С. 23–25.
16. Marcos-Meson V., Fischer G., Edvardsen C., Skovhus T.L., Michel A. Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 200, pp. 490–501. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051
17. Комохов П.Г., Сватовская Л.Б., Шангина Н.Н., Лейкин А.П. Управление свойствами цементных смесей природой наполнителя // *Известия вузов. Строительство*. 1997. № 9. С. 51–54.
18. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение / Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1986. 278 с.
19. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Эффективность применения ультрадисперсных отходов ферросплавного производства // *Бетон и железобетон*. 1989. № 8. С. 24–26.
20. Малинина Л.А., Довжиг В.Г., Лещинский М.Ю., Энтин З.Б. Экономия материалов и энергетических ресурсов в технологии бетонов // *Бетон и железобетон*. 1988. № 9. С. 25–27.
21. Афанасьев Н.Ф., Целуйко М.К.. Добавки в бетоны и растворы. Киев: Будивельник, 1989. 128 с.
22. Соломатов В.И., Селяев В.П., Федорцов А.П., Борисова Е.А. Цементные композиции с кремнеземистыми наполнителями // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1990. № 6. С. 53–56.
23. Соломатов В.И., Дудынов С.В., Федорцов А.П. Повышение кислотостойкости цементного бетона / Коррозия строительных конструкций и мероприятия по их эффективной защите. Саратов: Изд-во инст. Гипрониигаз, 1990. С. 3–10.
24. Федорцов А.П., Ошкина Л.М., Мартынова Л.А. и др. Улучшение свойств цементного камня путем введения добавок, образующих буферные системы // *Вестник Мордовского университета*. 1998. № 3–4. С. 101–105.
25. Федорцов А.П., Фомченков В.В., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Комплексные добавки для защиты бетона от коррозии. *Актуальные вопросы строительства: Материалы Международной научно-технической конференции*. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004. С. 301–304.
26. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шиссл П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
27. Химический энциклопедический словарь / Гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Совет. энцикл., 1983. 792 с.
28. Лазарев А.И., Харламов И.П., Яковлев П.Я., Яковлева Е.Ф. Справочник химика-аналитика. М.: Металлургия, 1976. 184 с.
16. Marcos-Meson V., Fischer G., Edvardsen C., Skovhus T.L., Michel A. Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 200, pp. 490–501. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051
17. Komokhov P.G., Svatovskaya L.B., Shangina N.N., Leikin A.P. Control of properties of cement mixtures by nature of filler. *Izvestija Vuzov. Stroitel'stvo*. 1997. No. 9, pp. 51–54. (In Russian).
18. Ramachandran V., Feldman R., Baudouin J. Nauka o betone: Fiziko-himicheskoe betonovedenie [Science of concrete: Physico-chemical concrete science] / trans. from Engl. Moscow: Stroyizdat. 1986. 278 p.
19. Batrakov V.G., Kapriellov S.S., Shejnfel'd A.V. Efficiency of using ultrafine wastes of ferroalloy production. *Beton i zhelezobeton*. 1989. No. 8, pp. 24–26. (In Russian).
20. Malinina L.A., Dovzhag V.G., Leshchinsky M.Y., Entin Z.B. Saving of materials and energy resources in concrete technology. *Beton i Zhelezobeton*. 1988. No. 9, pp. 25–27. (In Russian).
21. Afanasyev N.F., Tseluiko M.K.. Dobavki v betony i rastvory [Additives in concrete and mortars]. Kiev: Budivelnik. 1989. 128 p.
22. Solomatov V.I., Selyaev V.P., Fedortsov A.P., Borisova E.A. Cement compositions with silica fillers. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo i Arhitektura*. 1990. No. 6, pp. 53–56. (In Russian).
23. Solomatov V.I., Dudynov S.V., Fedortsov A.P. Povysheniye kislotostoykosti tsementnogo betona / Korroziya stroitel'nykh konstruksiy i meropriyatiya po ikh effektivnoy zashchite [Increase of acid resistance of cement concrete / Corrosion of building structures and measures for their effective protection]. Saratov: Publishing House of Giproniigaz Institute, 1990, pp. 3–10.
24. Fedortsov A.P., Oshkina L.M., Martynova L.A. et al. Improvement of cement stone properties by introduction of additives forming buffer systems. *Vestnik of the Mordovian University*. 1998. No. 3–4, pp. 101–105. (In Russian).
25. Fedortsov A.P., Fomchenkov V.V., Erofeev V.T., Mitina E.A. Complex additives for concrete corrosion protection. *Actual issues of construction: materials of the International scientific and technical conference*. Saransk: Publishing House of Mordovian University, 2004, pp. 301–304.
26. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Schissl P. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnyh sredah [Durability of reinforced concrete in aggressive media]. Moscow: Stroyizdat. 1990. 320 p.
27. Khimicheskij entsiklopedicheskiy slovar' [Chemical Encyclopedic Dictionary] / ed. by I.L. Knunyants. Moscow: Soviet Encyclopedic Dictionary. 1983. 792 p.
28. Lazarev A.I., Kharlamov I.P., Yakovlev P.Y., Yakovleva E.F. Spravochnik khimika-analitika [Reference book of analytical chemist]. Moscow: Metallurgy. 1976. 184 p.

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 графическом редакторе Adobe Illustrator (не выше v.CS6) и сохранен в форматах *.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>

V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«МОСТОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ:
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА
И РЕКОНСТРУКЦИИ»

20–22
СЕНТЯБРЯ 2023



МОСКВА
ОТЕЛЬ HOLIDAY INN SUSCHEVSKY

Организатор конференции



МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Официальная поддержка



Генеральный спонсор
конференции



Генеральные информационные партнеры



www.fc-union.com, info@fc-union.com, +7 (495) 66-55-014, +7 925 57-57-810

12+



100+ TECHNO BUILD

X Международный
строительный форум
и выставка

forum-100.ru

3-6 октября 2023
Екатеринбург



стать экспонентом

18 720
посетителей

322
экспонента

688
спикеров

207
секций

21
страна

*показатели 2022 года