

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№7



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ИЮЛЬ 2020 г. (782)

СИЛЬНЫЙ.
ПЛАСТИЧНЫЙ.
ЦЕПКИЙ.

СОЗДАН ВОПЛОЩАТЬ САМЫЕ СМЕЛЫЕ
ИДЕИ ДИЗАЙНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПЛИТКИ, КЕРАМОГРАНИТА И
ПРИРОДНОГО КАМНЯ



ВОЛМА

МУЛЬТИКЛЕЙ

Т 34

ПЛИТочный
особопластичный
высокопрочный

для всех типов керамической
плитки, керамогранита,
натурального камня,
для «теплого пола»
для наружных и внутренних
работ

25 кг



Комитет Торгово-промышленной палаты РФ по предпринимательству
в сфере строительства

АО «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования
жилых и общественных зданий» (АО «ЦНИИЭП жилища»)

Объединенная редакция научно-технических журналов
«Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®



X Международная научно-практическая конференция «InterConPan-2020: инновации для индустриального домостроения»

InterConPan-2020

International Conference of Large-panel Construction

7–9 сентября 2020 г. / September 7–9, 2020

Москва / Moscow

Место проведения: Конгресс-центр Торгово-промышленной палаты РФ

(Москва, ул. Ильинка, 6/1, стр. 1)



ТЕМАТИКА:

- Оборудование и технологии для модернизации предприятий КИД
- Инновационные строительные системы
- BIM технологии в сборном домостроении
- Современные бетоны, добавки и пигменты
- Архитектурно-планировочные решения
- Новые решения фасадов и внутренней отделки
- Качество и энергоэффективность индустриальных зданий
- Опыт строительства крупнопанельного жилья

ПРОГРАММА:

7 сентября Пленарное заседание

Секции: «Архитектура крупнопанельных зданий»;
«Инновационная технология предприятий индустриального домостроения»

8 сентября Выездная сессия

ЗАО «198 КЖИ» (АО ХК «ГВСУ «Центр»),
г. Можайск
Завод БЭНПАН (ООО «БЭНСТРОЙ»),
Московская обл.

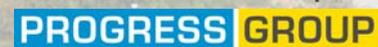
9 сентября Выездная сессия

Ростокинский завод ЖБК (ООО «Первый ДСК»)
г. Москва

Генеральный спонсор:



Постоянный спонсор:



Постоянный партнер:



Партнеры:



Электронная заявка: www.interconpan.ru

Организационный комитет:

Телефон: 8 903 550-20-35, +7 (499) 976-20-36, 976-22-08

kpd-conf@mail.ru

mail@rifsm.ru

www.rifsm.ru

Адрес для корреспонденции: 127434, Москва, Дмитровское ш., д. 9, стр. 3, оф. 408, редакция журнала «Жилищное строительство»

Гипсовые строительные материалы

А.Ф. БУРЬЯНОВ, Х.-Б. ФИШЕР, Н.А. ГАЛЬЦЕВА, Д.Н. МАХОРТОВ, Р.Р. ХАСАНШИН

Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего..... 4

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

Гипсовые модифицированные композиции с использованием активированного базальтового наполнителя 10

Н.С. РУЗИНА, Г.И. ЯКОВЛЕВ, А.Ф. ГОРДИНА, Г.Н. ПЕРВУШИН, Ю.А. СЕМЁНОВА, Е.В. БЕГУНОВА

Модификация вяжущих на основе сульфата кальция комплексными добавками 18

Ю.Г. МЕЩЕРЯКОВ, С.В. ФЁДОРОВ, В.П. СУЧКОВ

Влияние условий дегидратации гипса и фосфогипса на структуру и технические свойства вяжущего..... 23

Р.И. ШИГАПОВ, Д.А. СЕНИЦИН, Д.В. КУЗНЕЦОВ, А.М. ГАЙСИН, И.В. НЕДОСЕКО

Использование конструкционно-теплоизоляционного пеногипса при строительстве и реконструкции зданий. Проблемы и перспективы..... 28

М.С. ГАРКАВИ, А.В. АРТАМОНОВ, Е.В. КОЛОДЕЖНАЯ, А.П. НЕФЕДЬЕВ, Е.А. ХУДОВЕКОВА

Гипсовое вяжущее низкой водопотребности: производство и свойства..... 34

Нанотехнологии в строительстве

Ю.В. ПУХАРЕНКО, И.У. АУБАКИРОВА, В.И. ХИРХАСОВА

Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии..... 39

В.Н. МОРГУН, Л.В. МОРГУН, А.Ю. БОГАТИНА

Экспериментальная оценка наноэффектов в технологии пенобетонов..... 45

С.А. ЖДАНОК, Е.Н. ПОЛОНИНА, С.Н. ЛЕОНОВИЧ

Исследование методом ИК-спектроскопии степени активации углеродных наноматериалов для модифицирования конструкционного бетона..... 49

А.П. СВИНЦОВ, АББАС АБДУЛХУССЕЙН АБД НУР, АБДЕЛЬ-САТЕР АББАС, А.Н. СОРОКИН

Влияние наномодифицированной добавки на подвижность бетонных смесей 54

Результаты научных исследований

А.А. АСКАДСКИЙ, С. ВАН, В.И. КОНДРАЩЕНКО, Т.В. ЖДАНОВА, Т.А. МАЦЕЕВИЧ

Прогнозирование модуля упругости композитов на основе смесей полимеров 60

М.К. ИЦУК

Влияние различных факторов на оценку прочности кладки при сжатии (к вопросу совершенствования норм по каменным конструкциям) 67

Founder of the journal:
«STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Registration certificate PI № 77-1989
Included in the list of journals of
the Higher Attestation Commission
(Russia), Project Russian Science
Citation Index (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®

№ 7

Founded in 1955

(782) July 2020

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

Gypsum building materials

A.F. BURYANOV, H.-B. FISHER, N.A. GALTSEVA, D.N. MACHORTOV, R.R. HASANSHIN	
Research in the Influence of Various Activating Additives on the Properties of Anhydrite Binder	4
V.B. PETROPAVLOVSKAYA, M.Yu. ZAVAD'KO, T.B. NOVICHENKOVA, K.S. PETROPAVLOVSKII, A.F. BURYANOV	
Gypsum Modified Compositions with the Use of Activated Basalt Filler	10
N.S. RUZINA, G.I. YAKOVLEV, A.F. GORDINA, G.N. PERVUSHIN, Yu.A. SEMENOVA, E.V. BEGUNOVA	
Modification of Binders Based on Calcium Sulfate with Complex Additives	18
Yu.G. MESHCHERYAKOV, S.V. FEDOROV, V.P. SUCHKOV	
Influence of Gypsum and Phosphogypsum Dehydration Conditions on the Structure and Technical Properties of the Binder	23
R.I. SHIGAPOV, D.A. SINITSIN, D.V. KUZNETSOV, A.M. GAYSIN, I.V. NEDOSECO	
The Use of Structural and Thermal Insulation Foam Gypsum in the Construction and Reconstruction of Buildings. Problems and Prospects	28
M.S. GARKAVI, A.V. ARTAMONOV, E.V. KOLODEZHNYAYA, A.P. NEFEDJEV, E.A. KHUDOVEKOVA	
Gypsum Binder of Low Water Demand: Production and Properties	34

Nanotechnologies in construction

Yu.V. PUHARENKO, I.U. AUBAKIROVA, V.I. KHIRKHASOVA	
Cellulose in Concrete: a New Direction of Development of Construction Nanotechnology	39
V.N. MORGUN, L.V. MORGUN, A.Yu. BOGATINA	
Experimental Assessment of Nano-Effects in Foam Concrete Technology	45
S.A. ZHDANOK, E.N. POLONINA, S.N. LEONOVICH	
IR Spectroscopy Study of the Degree of Activation of Carbon Nanomaterials for Modifying Structural Concrete	49
A.P. SVINTSOV, ABBAS ABDULHUSSEIN ABD NOOR, ABBAS ABDEL-SATER, A.N. SOROKIN	
Influence of Nano-Modified Additives on the Mobility of Concrete Mixture	54

Results of scientific research

A.A. ASKADSKII, C. WANG, V.I. KONDRASHCHENKO, T.V. ZHDANOVA, T.A. MATSEEVICH	
Forecasting the Elasticity Modulus of Composites Based on Polymer Blends	60
M.K. ISHCHUK	
Influence of Different Factors on the Assessment of Strength of Masonry at Compression (to the question of improvement of norms on masonry constructions)	67

Редакционный совет

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)

ВАЙСБЕРГ Л.А.,

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

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 (Москва)

КРИВЕНКО П.В.,

д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

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

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

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

ТРАВУШ В.И.,

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

ФЕДОСОВ С.В.,

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

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ЧЕРНЫШОВ Е.М.,

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

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editorial Board

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

BURYANOV A.,

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

VAYSBERG L.,

Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS (St. Petersburg)

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

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

EROFEEV V.,

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

KOROLEV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Moscow)

KRIVENKO P.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,

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

LESOVIK V.,

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

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

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

PUKHARENKO Yu.,

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

TRAVUSH V.,

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

FEDOSOV S.,

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

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

CHERNYSHOV E.,

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

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

А.Ф. БУРЬЯНОВ¹, д-р техн. наук (rga-service@mail.ru);
Х.-Б. ФИШЕР², д-р-инженер (hans-bertram.fischer@uni-weimar.de);
Н.А. ГАЛЬЦЕВА¹, канд. техн. наук (galcevanadezda@mail.ru),
Д.Н. МАХОРТОВ¹, бакалавр (machortovdima@mail.ru),
Р.Р. ХАСАНШИН¹, бакалавр (robert.rh555@yandex.ru)

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

² Bauhaus-Universität (Coudraystraße 11, 99421 Weimar, Deutschland)

Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего

Актуальность материалов на основе природного ангидрита растет, так как при производстве их не приходится подвергать обжигу. Также данные материалы имеют хорошие физико-механические свойства. Поскольку реакция гидратации ангидрита является медленной, применяются специальные добавки (активаторы твердения). При добавлении различных сульфатов можно улучшить свойства вяжущего. В ходе работы проводились прочностные испытания образцов при сжатии и изгибе, измерения линейных деформаций, определение степени гидратации, сроки схватывания и pH на образцах с различным содержанием сульфатов. На прочность испытывались образцы-балочки (160×40×40 мм) на гидравлическом прессе. Величина pH смесей определялась с помощью электронного pH-метра. Степень гидратации определялась двумя методами: прерывание гидратации изопропанолом с последующей сушкой при 45°C; сушка при 45°C. Выявлено, что оптимальное содержание сульфата калия (K₂SO₄) и гидроксида кальция (Ca(OH)₂) придает наибольшую прочность и степень гидратации вяжущему. Установлено, что отдельные сульфаты по-разному влияют на линейную деформацию; самые большие увеличения объема наблюдались у образцов с pH=4,5–7, а наибольшая усадка – с pH=9–12.5. Также выявлено влияние сульфатного активатора на текучесть ангидритового теста.

Ключевые слова: ангидритовое вяжущее, добавки, активаторы твердения, сульфаты, прочность, сроки схватывания.

Для цитирования: Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Гальцева Н.А., Махортов Д.Н., Хасаншин Р.Р. Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 4–9.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>

A.F. BURYANOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), (rga-service@mail.ru);
H.-B. FISHER², Doctor-Engineer, (hans-bertram.fischer@uni-weimar.de);
N.A. GALTSEVA¹, Candidate of Sciences (Engineering), (galcevanadezda@mail.ru),
D.N. MACHORTOV¹, Bachelor, (machortovdima@mail.ru),
R.R. HASANSHIN¹, Bachelor, (robert.rh555@yandex.ru)

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

² Bauhaus-Universität (Coudraystraße 11, 99421 Weimar, Deutschland)

Research in the Influence of Various Activating Additives on the Properties of Anhydrite Binder

The relevance of materials based on natural anhydrite is growing, since they do not have to be fired during production. These materials also have good physical and mechanical properties. Since the hydration reaction of anhydrite is slow, special additives (hardening activators) are used. Adding the different sulfates, it is possible to improve the properties of the binder. In the course of the work, strength tests of samples under compression and bending, measurements of linear deformations, determination of the hydration degree, setting time and pH were performed on samples with different content of sulfates. Samples-beams (160×40×40 mm) were tested for strength on a hydraulic press. The pH value of the mixtures was determined using an electronic pH-meter. The degree of hydration was determined by two methods: 1) interruption of hydration with isopropanol followed by drying at 45°C; 2) drying at 45°C. It is revealed that the optimal content of potassium sulfate (K₂SO₄) and calcium hydroxide (Ca(OH)₂) gives the highest strength and degree of hydration to the binder. It is established that individual sulfates have different effects on linear deformation, the largest volume increases were observed in samples with pH=4.5–7, and the largest shrinkage with pH=9–12.5. The influence of the sulfate activator on the fluidity of the anhydrite paste is also revealed.

Keywords: anhydrite binder, additives, hardening activators, sulfates, strength, setting time.

For citation: Buryanov A.F., Fisher H.-B., Galtseva N.A., Machortov D.N., Hasanshin R.R. Research in the influence of various activating additives on the properties of anhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9>

Материалы на основе природного ангидрита широко используются в строительстве с давних времен и являются экологически чистым сырьем. При производстве их не приходится подвергать обжигу, именно поэтому актуальность данных материалов (как альтернатива цементу, извести и гипсу) растет [1]. Также ангидриты и изделия из них имеют хорошие физико-механические показатели. Так как

реакция взаимодействия ангидрита с водой является достаточно медленной, на практике применяют один из самых распространенных методов управления и улучшения свойств материала – введение специальных добавок (активаторов твердения) [2–6]. В качестве таких добавок используются смеси сульфатов щелочных и щелочно-земельных металлов, которые перемалываются совместно с ангидритом и таким

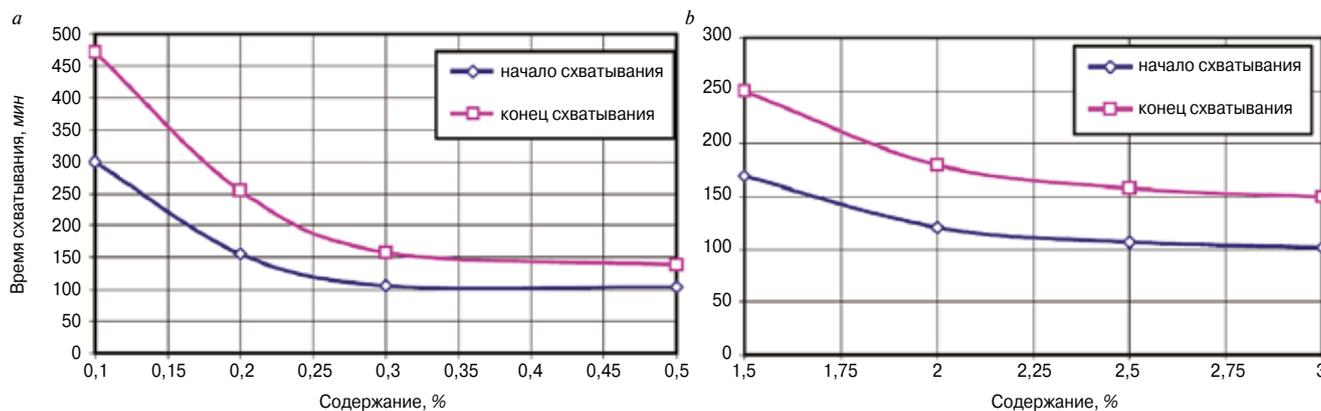


Рис. 1. Зависимость сроков схватывания от содержания: *a* – Ca(OH)₂; *b* – K₂SO₄
 Fig. 1. The dependence of the setting time on the content: *a* – Ca(OH)₂, *b* – K₂SO₄

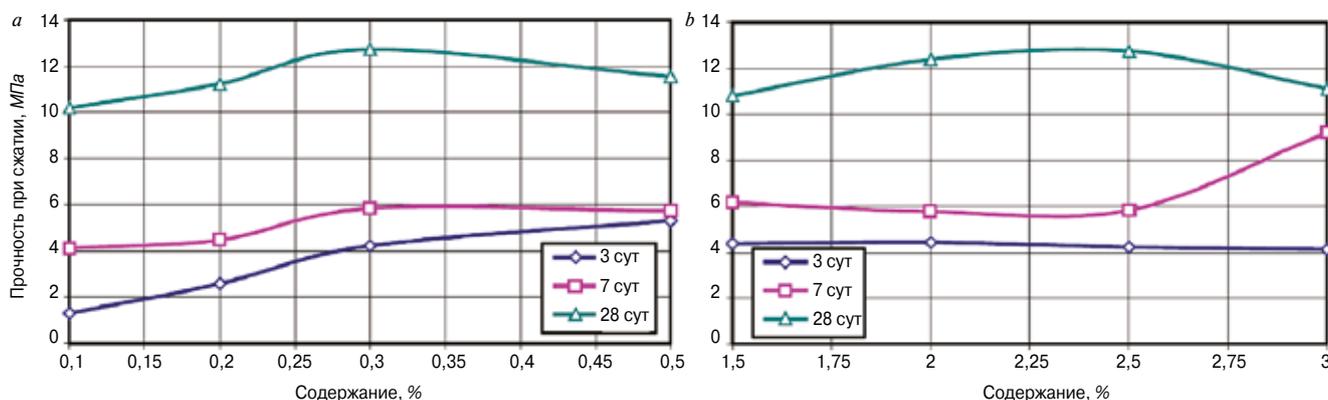


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии от содержания: *a* – Ca(OH)₂; *b* – K₂SO₄
 Fig. 2. The dependence of the compressive strength on the content: *a* – Ca(OH)₂; *b* – K₂SO₄

образом равномерно распределяются в объеме [5–7]. Из литературных источников и практического опыта предприятий-производителей строительной продукции известно, что базовая смесь из молотого природного ангидрита должна включать в себя сульфат калия K₂SO₄ и гидроксид кальция Ca(OH)₂ в качестве основных активаторов твердения. С помощью добавок других сульфатов можно улучшить состав вяжущего [8–12].

Цель работы

Целью работы явилось исследование и изучение свойств ангидритового вяжущего путем добавления различных видов добавок.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение оптимального содержания добавок K₂SO₄ и Ca(OH)₂ для дальнейших исследований;
- исследование влияния добавок (на основе оптимального содержания K₂SO₄ и Ca(OH)₂) на реакционную способность природного ангидрита.

Методы исследования смесей на основе синтетического ангидрита

Для испытания свойств вяжущего (природного ангидрита) использовались методические указания

по контролю качества и актуальные нормативные документы. Определяется: сроки схватывания, прочность, степень гидратация и рН.

По ГОСТ 23789–2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний (с Поправкой)» также определялись:

- прочность образцов при изгибе и сжатии, на образцах-призмах размером 160×40×40 мм;
- линейные деформации.

Степень гидратации определяется двумя методами:

Таблица 1
Table 1

Исследуемые составы Test compounds

№ состава	K ₂ SO ₄ , мас. %	Ca(OH) ₂ , мас. %
1	2,5	0,1
2	2,5	0,2
3	2,5	0,3
4	2,5	0,5
5	1,5	0,3
6	2	0,3
7	3	0,3

**Таблица 2
Table 2**

**Результаты исследований базовых свойств
Basic properties research results**

№ состава	рН	Сроки схватывания, мин		Прочность, МПа, в сроки твердения						Степень гидратации через 28 сут
				при сжатии			при изгибе			
		начало	конец	3 сут	7 сут	28 сут	3 сут	7 сут	28 сут	
1	11,5	300	472	1,3	4,1	10,2	0,7	1,5	3,9	0,44
2	12,5	156	255	2,6	4,5	11,2	0,9	1,5	3,9	0,46
3	13	106	158	4,2	5,8	12,7	1,2	1,7	4	0,47
4	13,5	104	139	5,3	5,7	11,6	1,3	1,5	4	0,47
5	13	170	250	4,4	5,9	10,8	1,2	1,5	3	0,45
6	13	120	180	4,4	5,8	12,4	1,3	1,5	3,6	0,48
7	13	101	150	4,1	6,2	11,1	1,3	1,7	3,4	0,43

**Таблица 3
Table 3**

**Результаты испытаний ангидритовых вяжущих при добавке смеси сульфатов в базовый состав
Test results of anhydrite binders when adding a mixture of sulfates to the base composition**

№ состава	Вид активатора	рН	Начало схватывания, МИН	Конец схватывания, МИН	R _{сж} , МПа			R _{изг} , МПа			Степень гидратации через 28 сут	Линейные деформации, мм/м
					3 сут	7 сут	28 сут	3 сут	7 сут	28 сут		
					8	-	13	120	180	13		
9	KAl(SO ₄) ₂ ×12H ₂ O	10,5	290	375	9,8	13,2	18	2,8	3,9	4,9	0,49	0,26
10		9	274	343	10,3	16,9	23,2	3,2	4,7	5,5	0,54	-0,08
11		7	35	52	28,9	37	38,3	6	7	7,9	0,79	5,9
12	CuSO ₄	12,5	200	270	5,5	11,5	18,2	2,3	4,0	5,6	0,48	-0,05
13		9,5	39	51	27,7	38,4	39,9	6,5	9,5	9,6	0,79	0,73
14		4,5	88	110	30,6	37,3	39,9	5,4	7,2	7,9	0,94	2,76
15	FeSO ₄ ×7H ₂ O	12,5	362	387	15,2	16,2	21,4	4	4,8	5,1	0,54	0,01
16		7	64	114	22,7	25,2	30,5	6,5	7,3	7,5	0,7	0,04
17		5	84	141	28,6	36,6	37,8	4,7	6,1	6,2	0,91	0,83
18	Na ₂ SO ₄	13,5	67	100	17,2	20	23,3	5	6,7	8	0,55	0,15
19		14	57	82	23	25,8	30	5,7	6,3	7	0,63	0,21
20		14	49	74	16,8	23,7	28,2	5,7	6,4	7,5	0,73	0,28
21	MgSO ₄ ×7H ₂ O	10,5	320	350	13,8	17,4	22,6	3,7	4,7	5,7	0,52	0,34
22		10	247	300	13,3	17,8	21,3	3,1	3,9	5,1	0,57	0,25
23		10	270	331	11,5	16,4	21,7	2,7	3,7	4,6	0,63	0,32
24	KHSO ₄	12,5	183	200	11,5	15,8	21,7	2,7	4,4	5,4	0,48	0,26
25		12,5	64	99	6,0	16,0	16,7	4,8	6,5	6,9	0,6	-0,09
26		12,5	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
27	(NH ₄) ₂ SO ₄	12	288	348	8,8	14,5	20,2	3	4,9	6,9	0,5	0,17
28		10	300	380	13	23,4	27,7	3,3	6,5	6,9	0,67	0,19
29		9	314	405	9,5	18,8	21,2	3,7	5,4	6,2	0,66	0,4
30	ZnSO ₄ ×H ₂ O	11	300	320	6	9,9	16,7	2,8	3,3	5	0,45	-0,62
31		7,5	50	60	20	30,9	35,4	4,3	5,1	5,7	0,75	0,94
32		7	50	62	31,6	37,3	42,6	5,8	6,4	6,4	0,94	1,19

Примечание. ** Показатели данных образцов не были измерены вследствие газообразования.

- прерывание гидратации изопропанолом с последующей сушкой при 45°C;
- сушка при 45°C.

Прочность образцов при изгибе и сжатии определялась на гидравлическом прессе Controls 50-C8422 (диапазон измерений до 15, 100 и 250 кН). Величина рН смесей определялась с помощью электронного рН-метра.

Определение оптимального содержания K_2SO_4 и $Ca(OH)_2$

Определение оптимального соотношения между K_2SO_4 и $Ca(OH)_2$ необходимо, так как это два самых используемых компонента для улучшения свойства ангидритового вяжущего. Сульфат калия (K_2SO_4) и гидроксид кальция ($Ca(OH)_2$) используются в качестве основных активаторов твердения. На базе оптимального состава проводились дальнейшие исследования свойств.

Для исследования свойств было выбрано семь составов с дозировкой K_2SO_4 от 1,5 до 3 мас. % и $Ca(OH)_2$ от 0,1 до 0,3 мас. % (табл. 1). Маленькая дозировка гидроксида кальция обусловливается низкой его растворимостью при 20°C, равной 1,7 г/л. Масса природного ангидрита принимается за 100 г, воды – 38 мл в каждом составе.

Результаты исследований базовых свойств обобщены в табл. 2.

Как видно из полученных результатов (табл. 2), величина рН находится в пределах 11,5–13,5 в зависимости от концентрации извести в составе, тогда как количество сульфата калия не повлияло на результаты испытания.

При увеличении добавки $Ca(OH)_2$ происходило сокращение времени схватывания. Это наглядно видно, если сравнить результаты составов № 1 и 2, где концентрация $Ca(OH)_2=0,1-0,2$ соответственно, со смесью № 4, в которой достигается наименьший срок схватывания (рис. 1). Также в составе № 6 степень гидратации достигает максимального значения 0,48 в течение 28 сут. Наибольшая прочность была отмечена в составе № 3 с концентрацией 0,3% $Ca(OH)_2$ и 2,5% K_2SO_4 .

Зависимости сроков схватывания и $R_{сж}$ представлены на рис. 1 и 2.

В ходе данного исследования был получен оптимальный состав (№ 6) для дальнейшего исследования влияния других активизирующих добавок на смесь. Дозировка сульфата калия и гидроксида кальция принята 2 и 0,3% соответственно. Данное соотношение показало наибольшую прочность и степень гидратации среди всех результатов.

Исследование свойств вяжущего при добавлении различных активизирующих добавок

Исследование было решено проводить на основе оптимальной рецептуры смеси активаторов (0,3% $Ca(OH)_2$ и 2% K_2SO_4) путем добавления других сульфатов для определения изменения свойств вяжущего.

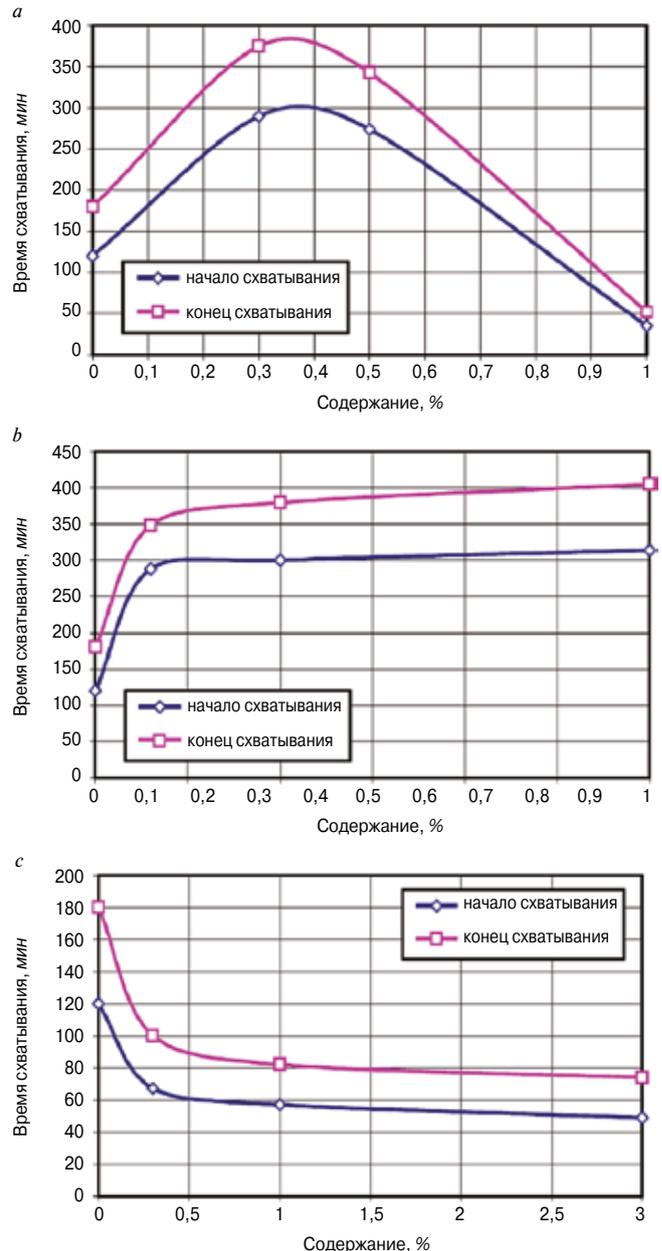


Рис. 3. Зависимость времени схватывания от содержания добавки: а – $KAl(SO_4)_2 \times 12H_2O$; б – $(NH_4)_2SO_4$; с – Na_2SO_4
Fig. 3. The dependence of the setting time on the content of the additive: а – $KAl(SO_4)_2 \times 12H_2O$; б – $(NH_4)_2SO_4$; с – Na_2SO_4

Для опытов было принято три группы вяжущих с содержанием извести 0,3%:

- сульфаты, при которых рН=10–14 остается на том же уровне или незначительно изменяется (Na_2SO_4 , $MgSO_4 \times 7H_2O$, $KHSO_4$);
- сульфаты, при которых происходит незначительное понижение рН=7–10 ($(NH_4)_2SO_4$ и $ZnSO_4 \times H_2O$);
- сульфаты, при которых рН<7 ($KAl(SO_4)_2 \times 12H_2O$; $CuSO_4$ и $FeSO_4 \times 7H_2O$).

Данные сульфаты были приняты в количестве 0,3, 1 и 3%. Также в расчетах учитывается гидратная вода. Масса природного ангидрита принимается за 100 г, воды – 38 мл в каждом составе. За базовую

смесь принимают образец под номером 8. Образцы под номером 9–32 используются как экспериментальные.

Все составы подвергаются испытаниям на прочность при сжатии (изгибе), сроки схватывания, pH, степень гидратации, линейные деформации. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Рассмотрим зависимости времени схватывания по виду активаторов, которые представлены на рис. 3.

Из данных графиков можно наблюдать, что добавка сульфата алюминия-калия и сульфата натрия (рис. 3, *с*) ускоряет процессы схватывания, при этом добавка сульфата аммония, наоборот, замедляет процессы схватывания (рис. 3, *б*). При добавлении $KAl(SO_4)_2 \times 12H_2O$ и $CuSO_4$ в базовую смесь можно существенно повысить прочность ангидрита и незначительно – при добавлении $MgSO_4 \times 7H_2O$. По полученным результатам испытаний можно заключить, что использование большинства сульфатов может привести к значительному увеличению прочности даже при малых расходах активатора (0,3%).

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что отдельные сульфаты (частично и в зависимости от дозировки) по-разному влияют на процессы ли-

нейной деформации. Так, при добавлении в смесь максимальной концентрации сульфата можно наблюдать максимальную вершину линейной деформации.

Самые большие показатели увеличения объема смеси и наибольшая прочность (следовательно, и более глубокий процесс гидратации) наблюдались в образцах с $pH=4,5-7$.

К усадке ангидритового вяжущего привели добавки с $pH=9-12,5$:

- 1% сульфата железа ($FeSO_4 \times 7H_2O$);
- 0,5% сульфата алюминия-калия ($KAl(SO_4)_2 \times 12H_2O$);
- 1% гидросульфата калия ($KHSO_4$);
- 0,3% сульфата меди ($CuSO_4$);
- 0,3% сульфата цинка ($ZnSO_4 \times H_2O$).

Смеси с данным составом имели низкую прочность, длительные сроки схватывания и низкую степень гидратации.

Также было выявлено, что сульфатный активатор оказывает влияние на текучесть ангидритового теста. Так, добавка сульфата аммония в количестве 0,3–3% и 1–3% сульфата цинка повышает пластичность смеси. Выявлено, что образцы с добавлением Na_2SO_4 имеют высолы независимо от содержания добавки. А высокие концентрации $FeSO_4 \times 7H_2O$, $MgSO_4 \times 7H_2O$ способствуют устранению высолов на образцах.

Список литературы

1. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magalanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. *2 International conference on Bio-based Building materials*. 2017, pp. 1–5.
2. Фишер Х.-Б., Второв Б.Б. Влияние активаторов твердения на свойства природного ангидрита. *II Международное совещание по химии и технологии цемента*. 4–8 декабря 2000 г. Москва. Т. 2. С. 53–61.
3. Клименко В.Г., Павленко В.И., Гасанов С.К. Влияние pH жидкости затворения на прочностные свойства гипсовых вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 5. С. 16–20.
4. Клименко В.Г., Павленко В.И., Елистраткин М.Ю. Комплексные активаторы твердения ангидрида на основе сульфата аммония // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. № 5. С. 28–30.
5. Клименко В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na^+ , K^+ , Ca_2^+ , NH_4^+ в технологии получения ангидритовых вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 12. С. 119–125.
6. Клименко В.Г., Гасанов С.К., Кашин Г.А. Исследования физико-химических процессов в системе сульфат кальция – магнетит // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 8. С. 134–139.
7. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного

References

1. Guerra-Cossio M.A., González-Lopez J.R., Magalanes-Rivera R.X., Zaldivar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Calcium sulfate: an alternative for environmentally friendly construction. *2 International conference on Bio-based Building materials*. 2017, pp. 1–5.
2. Fisher H.-B., Vtorov B.B. The effect of hardening activators on the properties of natural anhydrite. *II International meeting on the chemistry and technology of cement*. December 4–8, 2000. Moscow. Vol. 2, pp. 53–61. (In Russian).
3. Klimentko V.G., Pavlenko V.I., Gasanov S.K. The influence of the pH of the mixing fluid on the strength properties of gypsum binders. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2014. No. 5, pp. 16–20. (In Russian).
4. Klimentko V.G., Pavlenko V.I., Elistratkin M.Yu. Complex activators of hardening of anhydrite based on ammonium sulfate. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2013. No. 5, pp. 28–30. (In Russian).
5. Klimentko V.G. The role of double salts based on Na^+ , K^+ , Ca_2^+ , NH_4^+ sulfates in the technology of producing anhydrite binders. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 12, pp. 119–125. (In Russian).
6. Klimentko V.G., Gasanov S.K., Kashin G.A. Studies of physicochemical processes in the system of calcium sulfate – magnetite. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 8, pp. 134–139. (In Russian).

- генезиса // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 10. С. 27–34.
8. Аниканова Л.А., Курмангалиева А.И., Волкова О.В., Первушина Д.М. Влияние пластифицирующих добавок на свойства газогипсовых материалов // *Вестник ТГАСУ*. 2020. №1. С. 106–117.
 9. Kodzoev M-B., Isachenko S., Kosarev S., Basova A., Skvortzov A., Asamatdinov M., Zhukov A. Modified gypsum binder. *MATEC Web of Conferences*. St. Petersburg. 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/201817003022
 10. Jassim Muhsin Aliewi, Abdul Qader Nihad Noori, Arshad Nadhom M. Ali. Effect of adding industrial wastes on the mechanical properties of gypsum. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2019. Vol. 8. Iss. 8, pp. 2123–2125. DOI: 10.21275/ART2020736
 11. Dominic Gazdic, Jana Mokra, Jan Hanacek. Influence of Plasticizers on Properties of Anhydrite Binder. *Key Engineering Materials*. 2018, pp. 16–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.16
 12. Lei Yang, Min Jing, Lingchao Lu, Xiantao Song, Xiaobin Dong. Properties and micro-structures assessment of building materials based on flue gas desulfurization gypsum modified by cement and industrial waste. *Ceramics-Silikaty*. 2019. Vol. 63. Iss. 2, pp. 174–184. DOI: 10.13168/cs.2019.0009
 7. Drebezgova M.Yu., Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Composite gypsum binder with multicomponent mineral additives of different genesis. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 10, pp. 27–34. (In Russian).
 8. Anikanova L.A., Kurmangaliev A.I., Volkova O.V., Pervushina D.M. The effect of plasticizing additives on the properties of gypsum materials. *Vestnik TGASU*. 2020. No. 1, pp. 106–117. (In Russian).
 9. Kodzoev M-B., Isachenko S., Kosarev S., Basova A., Skvortzov A., Asamatdinov M., Zhukov A. Modified gypsum binder. *MATEC Web of Conferences*. St. Petersburg. 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/201817003022
 10. Jassim Muhsin Aliewi, Abdul Qader Nihad Noori, Arshad Nadhom M. Ali. Effect of adding industrial wastes on the mechanical properties of gypsum. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2019. Vol. 8. Iss. 8, pp. 2123–2125. DOI: 10.21275/ART2020736
 11. Dominic Gazdic, Jana Mokra, Jan Hanacek. Influence of Plasticizers on Properties of Anhydrite Binder. *Key Engineering Materials*. 2018, pp. 16–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.760.16
 12. Lei Yang, Min Jing, Lingchao Lu, Xiantao Song, Xiaobin Dong. Properties and micro-structures assessment of building materials based on flue gas desulfurization gypsum modified by cement and industrial waste. *Ceramics-Silikaty*. 2019. Vol. 63. Iss. 2, pp. 174–184. DOI: 10.13168/cs.2019.0009

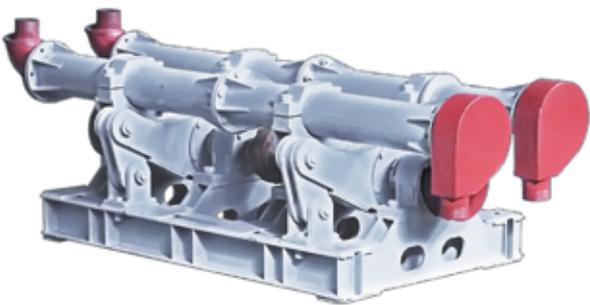


Активатор
измельчение активация синтез

Российские промышленные и лабораторные шаровые мельницы интенсивного помола.

Реклама

Центробежные эллиптические мельницы



Высокая производительность при низком энергопотреблении

- *смешение компонентов
- *активация цемента
- *получение сухих смесей
- *подготовка шихты
- *помол наполнителей
- *помол пигментов

Лабораторные планетарные мельницы



Мельницы для пробоподготовки
Высокоинтенсивная обработка

Мельницы, другое оборудование и результаты помола материалов на
www.activator.ru

Новосибирск,
Софийская 14, оф 17
630056, Новосибирск 56, а/я 141
Тел: +7 (3845) 71 0 61
+7 960 780 77 06
e-mail: zhm.activator@gmail.com

В.Б. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ¹, канд. техн. наук (victoriapetrov@gmail.com),
М.Ю. ЗАВАДЬКО¹, магистр (79043517876@yandex.ru),
Т.Б. НОВИЧЕНКОВА¹, канд. техн. наук (tanovi.69@mail.ru);
К.С. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ², инженер (raikiri@inbox.ru), А.Ф. БУРЬЯНОВ², д-р техн. наук (tvvib@mgsu.ru)

¹ Тверской государственный технический университет (170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22)

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

Гипсовые модифицированные композиции с использованием активированного базальтового наполнителя

В процессе производства базальтовых волокон образуются значительные объемы волокнистых отходов, а в цехах фильтрами улавливается большое количество дисперсной пыли – все это относится к отходам, которые на данный момент не вовлекаются в промышленное производство, а подлежит захоронению на полигонах. Ежегодно на полигонах складирования ТБО оказывается около 150 тыс. т отходов вторичного базальтового волокна, занимая значительные земельные площади. Наиболее популярной сферой использования волокнистых базальтовых отходов является их применение в производстве бетонов. Однако это вызывает необходимость защиты волокна от щелочной среды портландцемента, которая приводит к скорому ее разрушению. Применение отходов базальтовых волокон в гипсовых материалах более перспективно. Однако это требует решения вопросов по влиянию механической активации и очистки от замасливателя на свойства композиций. В данном исследовании применяли гипсовое вяжущее (ГВ) β-модификации марки Г-4, портландцемент (ПЦ) марки ПЦ-400, активированный отход производства базальтовых волокон – пыль с присутствием грубодисперсных (~1000 мкм), средних и высокодисперсных частиц (~10 мкм). Исследованиями гранулометрического состава активированного отхода установлено, что измельчение способствует уменьшению размера частиц. Введение активированного отхода в количестве 10% от массы гипсового вяжущего позволяет повысить прочность при сжатии получаемого гипсового камня на 10%, в то время как использование отхода в исходном (неактивированном) состоянии приводит к снижению прочности модифицированного гипсового камня на 20%. Однако анализ результатов исследований гипсоцементного состава с активированным базальтовым порошком показал, что влияния активации базальтового отхода на прочность и плотность гипсоцементных композиций не происходит. В процессе активации отхода происходит коагуляция замасливателя, однако это мало сказывается на свойствах. Необходимо отметить влияние оксидного состава базальтового отхода на процесс структурообразования гипсовых и гипсоцементных композитов, модифицированных высокодисперсным базальтовым порошком. Установлено, что активация пылевидного отхода производства базальтовых волокон позволяет изменить его зерновой состав, реакционную способность, обеспечить повышенную дисперсность и дефектность структуры, а значит, и химическую активность.

Ключевые слова: гипсовые композиты, композиционное вяжущее, гипс, базальтовые волокна, базальтовый отход, активация, замасливатель.

Для цитирования: Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Гипсовые модифицированные композиции с использованием активированного базальтового наполнителя // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-10-17>

V.B. PETROPAVLOVSKAYA¹, Candidate of Science (Engineering), M.Yu. ZAVAD'KO¹, Master,

T.B. NOVICHENKOVA¹, Candidate of Science (Engineering) (tanovi.69@mail.ru), K.S. PETROPAVLOVSKIY², Engineer (raikiri@inbox.ru);

A.F. BURYANOV², Doctor of Science (Engineering) (tvvib@mgsu.ru)

¹ Tver State Technical University (22, Afanasiy Nikitin Embankment, Tver, 170026, Russian Federation)

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

Gypsum Modified Compositions with the Use of Activated Basalt Filler

During the production of basalt fibers, significant amounts of fibrous waste are generated, and in the workshops, filters capture a large amount of dispersed dust – all this refers to waste that is currently not involved in industrial production, but is buried in landfills. Every year, about 150 thousand tons of secondary basalt fiber waste is deposited in landfills, occupying significant land areas. The most popular use of fibrous basalt wastes is their use in the production of concrete. However, this makes it necessary to protect the fiber from the alkaline environment of Portland cement, which leads to its rapid destruction. The use of waste basalt fibers in gypsum materials is more promising. However, this requires solving problems about the influence of mechanical activation and cleaning from the oiling agent on the properties of compositions. In this study, gypsum binder (GB) β-modification of the G-4 brand, Portland cement (PC) of the PC-400 brand, activated waste from the production of basalt fibers – dust with the presence of coarse (~1000 microns), medium and high-dispersed particles (~10 microns) were used. Studies of the granulometric composition of activated waste have established that grinding reduces the size of particles. The introduction of activated waste in the amount of 10% of the mass of the gypsum binder makes it possible to increase the compressive strength of the resulting gypsum stone by 10%, while the use of waste in the original (not activated) state leads to a decrease in the strength of the modified gypsum stone by 20%. However, the analysis of the results of studies of gypsum cement composition with activated basalt powder shows that the effect of activation of basalt waste on the strength and density of gypsum cement compositions does not occur. During the activation of the waste, the oiling agent coagulates, but this has little effect on the properties. It is necessary to note the influence of the oxide composition of basalt waste on the process of structure formation of gypsum and gypsum-cement composites modified with highly dispersed basalt powder. It was found that activation of the dust-like waste of basalt fiber production makes it possible to change its grain composition, reacting capacity, provide increased dispersion and structure imperfection, and hence its chemical activity.

Keywords: gypsum composites, composite binder, gypsum, basalt fibers, basalt waste, activation, oiling agent.

For citation: Petrovskaya V.B., Zavad'ko M.Yu., Novichenkova T.B., Petrovskiy K.S., Buryanov A.F. Gypsum modified compositions with the use of activated basalt filler. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 10–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-10-17>

Производство базальтовых волокон является одним из быстрорастущих сегментов строительного рынка. Связано это преимущественно с тем, что области применения волокон расширяются, появляется множество композиционных материалов на их основе. Среднегодовой темп роста рынка базальтовой продукции, по прогнозам до 2025 г., составит около 14% [1, 2]. Следует также отметить, что в последнее время базальтовые волокна все чаще применяются при разработке новых высокопрочных композитов не только в строительстве, но и в других отраслях. Например, по данным автора работы [3], базальтовые волокна – перспективный материал для композиций, предназначенных для судостроения, позволяющий добиться высоких аэро- и гидрохарактеристик судов, где они успешно комбинируются с различными составами связующих, как и стекловолокно. Однако проведенный сравнительный анализ эффективности производства [3] базальтовых и стеклянных волокон как наполнителей высокопрочных композитов показал более низкую себестоимость первых при сходных основных характеристиках материалов, что повышает их конкурентоспособность. Таким образом, эти два вида волокон являлись и являются по сей день конкурирующими при создании композиционных материалов во многих отраслях, однако постепенно спрос на базальтовые волокна начинает расти и на данный момент сдерживается лишь отсутствием сертификации базальтовых волокон в качестве армирующих материалов, что является лишь вопросом времени.

Наиболее востребованными базальтовые волокна остаются в строительной сфере, что отчасти связано с дефицитом ресурсов для производства металлических материалов [4]. Однако волокна также довольно широко применяются при разработке композитов для нефтяной и газовой отрасли, коммунального и водного хозяйства [5]. Базальтовые волокна обладают высокой химической стойкостью, стойкостью к перепадам температуры, отвечают требованиям по пожарной безопасности, биологически пассивны [6]. Поэтому их применение в качестве основы конструкционного материала целесообразно и имеет много преимуществ [7–9].

Как правило, производство базальтового волокна состоит из следующих этапов: подача и подогрев базальтовой породы, плавление, удаление примесей, дегазация расплава, непрерывное плавление, вытягивание волокна с помощью фильерных установок или формирование за счет перфорированных установок, нанесение замазливателя и намотка на бобины [8, 10, 11]. Примечательно, что сырье для производства волокон должно обладать определенными свойствами, при этом модуль кислотности является определяющим критерием. Задача технологов также заключается в том, чтобы исключить при плавлении эффекты кристаллизации [12].

Производство базальтовых волокон, как правило, состоит из трех основных подразделений:

1. Цех подготовки, состоящий из участка дробления и открытого склада.

2. Цех производства волокна, включающий участок базальтопрядильных агрегатов, участок ровинговых агрегатов, участок приготовления раствора замазливателя, склад замазливателей и участок упаковки и маркировки.

3. Лаборатория контроля качества, которая располагается в отдельном помещении [13].

Если проследить технологический процесс подробно, по этапам, базальт, поставляемый с карьера, проходит химический контроль, после чего поступает на склад подготовки сырья, где сортируется и промывается. После промывки порода поступает в плавильную зону печи базальтопрядильного агрегата, а затем в выработочную часть печи, из которой и поступает в фильерный питатель. Капли, вытекая из фильер, вытягиваются в непрерывное волокно, диаметр которого регулируется скоростью вытекания и вытяжки волокна. После этого на первичную нить наносят замазливатель, выдерживают в условиях кондиционирования и отправляют на контроль качества [13].

Стоит отметить, что в процессе производства базальтовых волокон образуются значительные объемы волокнистых отходов, а в цехах фильтрами улавливается большое количество дисперсной пыли – все это относится к отходам, которые на данный момент подлежат захоронению [14]. Авторы работы [15] также отмечают, что ежегодно на полигонах складирования ТБО оказывается около 150 тыс. т отходов вторичного базальтового волокна, а это внушительные площади, учитывая их низкую насыпную плотность. Именно поэтому переработка отходов базальтового производства – довольно острая на сегодняшний день проблема.

Многие исследователи ставят перед собой задачу разработки таких композитов, в составе которых можно было бы эффективно применять отходы базальтового производства [16], обеспечив их полную утилизацию в реальное производство и тем самым снизить издержки базальтовой промышленности. Наиболее популярной сферой использования является применение волокнистых базальтовых отходов в производстве бетонов как наиболее массовой строительной продукции. Однако и в этой области существует ряд спорных вопросов, которые касаются оптимизации протекающих технологических процессов в системах портландцемент–базальтовое волокно [17]. Повышение характеристик бетонов, в частности трещиностойкости, при армировании их базальтовыми волокнами отмечается многими авторами [18–20]. Однако базальтовое волокно хоть и является востребованным наполнителем в бетонах, выступающим в качестве армирующего компонента, многие авторы отмечают необходимость его защиты от щелочной среды портландцемента, которая приводит к скорому разрушению волокна [20, 21]. Изучение коррозионного воздействия продуктов гидратации цемента показало, что базальтовое волокно по отношению к CaO обладает большей реак-

ционной способностью, чем кварцевый песок, что говорит о химическом взаимодействии базальта с продуктами гидратации цемента. Однако механизм разрушения базальтовых волокон в щелочной среде полностью не изучен.

Некоторые исследователи склоняются к мнению, что щелочная среда портландцемента приводит к полному растворению волокна. При этом даже если катионы щелочного раствора образуют соединения с нерастворимыми продуктами разрушения волокна и на поверхности образуется пленка, препятствующая скорому ее разрушению, эта пленка обладает слабой адгезией к самому волокну, поэтому при растяжении волокно перестает работать как армирующий компонент [22–23].

Таким образом, анализ исследованных литературных источников показал, что введение базальтовых волокон без дополнительной их защиты в среду портландцемента целесообразно по критерию трещиностойкости, но неэффективно по критерию прочности в отдаленные сроки структурообразования в связи с коррозией волокна в щелочной среде. В связи с этим необходимо заметить, что при введении дисперсных отходов производства базальтового волокна в качестве наполнителя в бетонах требуется осуществлять контроль щелочности среды.

Применение базальтовых волокон в гипсовых материалах или изделиях на основе гипсового вяжущего и его модификаций, напротив, недостаточно изучено в связи с отсутствием необходимости повышения показателя трещиностойкости гипсовых материалов и изделий в отличие от бетонных. При этом нейтральная среда гипсового вяжущего позволяет сохранить базальтовое волокно, а следовательно, и его армирующий эффект на всем сроке эксплуатации изделий из гипса [24–26]. Это позволяет допустить высокую сохранность и эффективность применения дисперсных отходов базальтового производства в составе гипсовых композитов.

Следовательно, разработка гипсовых материалов, модифицированных дисперсными отходами базальтового производства, является перспективным направлением исследований, которые смогут обеспечить высокие эксплуатационные свойства гипсовых композитов, с одной стороны, и утилизацию невосстановленных в настоящее время отходов – с другой.

Свойства разрабатываемых материалов на модифицированном гипсовом вяжущем будут определяться рядом важных факторов, в числе которых свойства вяжущей матрицы, наполнителя – дисперсного отхода, а также адгезия армирующего наполнителя к матрице.

Для успешной разработки строительного гипсового композита, эффективность производства которого была бы максимальной, необходимо рассмотреть в исследованиях ряд вопросов, в том числе:

– есть ли необходимость избавляться от замасливателя на частицах базальтового отхода до его введения в состав гипсового композита. Как известно,



Рис. 1. Внешний вид базальтового отхода
Fig. 1. Appearance of basalt waste

Таблица 1
Table 1

Химический состав базальтового отхода
The chemical composition of basalt waste

Оксид	Содержание, %
SiO ₂	41,13
MgO	14,66
CaO	13,81
Fe ₂ O ₃	7,34
Na ₂ O	6,59
Cl	4,29
K ₂ O	4,14
Al ₂ O ₃	3,99
S	1,57
ZnO	1,11
MnO	0,428
F	0,32
TiO ₂	0,262
P	0,191
CuO	0,0904
SrO	0,0323
Cr ₂ O ₃	0,0207
Co ₃ O ₄	0,0117

Таблица 2
Table 2

Минералогический состав базальтового отхода
The mineralogical composition of basalt waste

Кварц	Кальцит	Доломит	Периклаз	Хлорид натрия	Хлорид калия	Ангидрит	Аморфная фаза
5,1	7,6	19	5,9	6,1	1,8	5	50



Рис. 2. Формование образцов: *a* – на основе модифицированного гипсового вяжущего и исходного базальтового отхода (без помола); *b* – на основе модифицированного гипсового вяжущего и базальтового отхода, активированного в планетарной мельнице

Fig. 2. The process of forming samples: *a* – based on a modified gypsum binder and initial basalt waste (without size reduction); *b* – based on a modified gypsum binder and activated basalt waste

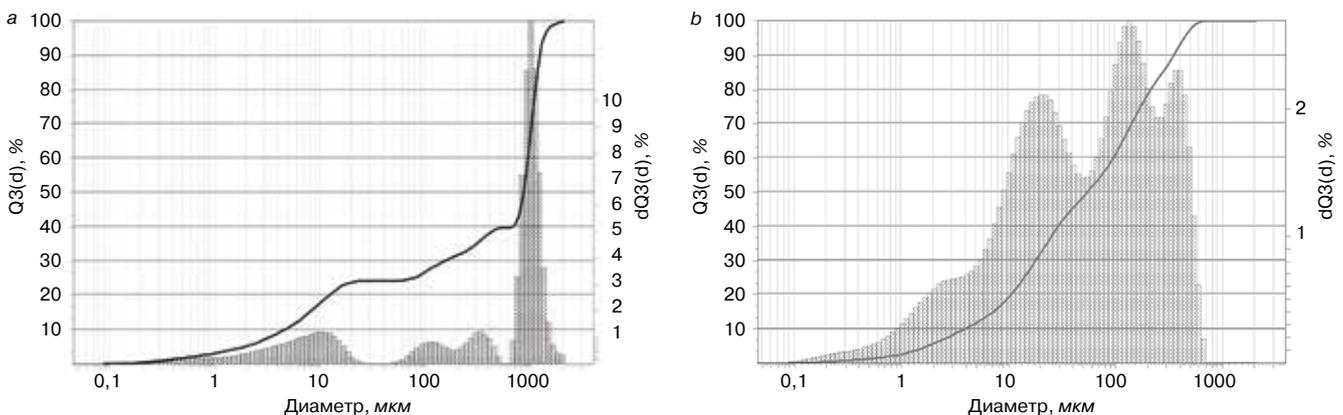


Рис. 3. Гранулометрический состав базальтового отхода: *a* – до активации; *b* – после активации

Fig. 3. Grain size composition of basalt waste: *a* – before activation; *b* – and after activation

нанесение замасливателя является обязательным этапом производства волокна [26], который может негативно повлиять на адгезию армирующих частиц отхода и частиц вяжущего и, как следствие, на прочность модифицированного камня;

– насколько эффективна механическая активация отхода до введения его в состав композита.

Материалы и методы исследований

В представленном исследовании в качестве основного компонента применяли гипсовое вяжущее (ГВ) β -модификации марки Г-4 Самарского гипсового комбината, которое характеризовалось водопотребностью – 70%, началом схватывания – 15–16 мин и концом схватывания – 25 мин. Предел прочности при сжатии через 2 ч составил 4 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе – 2 МПа. Для повышения водостойкости в используемые смеси включали дополнительно портландцемент (ПЦ) марки ПЦ-400. В качестве наполнителя в составах применялся отход производства базальтовых волокон – базальтовая пыль (БП) (рис. 1), скапливающаяся на фильтрах пылеулавливающих установок в различных цехах базальтового

производства. Химический и минеральный составы (табл. 1, 2) показывают наличие, помимо традиционных силикатных и кальциево-магниевого фаз, достаточно большое содержание хлоридов.

Присутствие оксидов железа и в меньшем количестве оксидов алюминия тоже может отражаться на процессе твердения и свойствах модифицированного гипсоцементного камня.

Смеси затворялись дистиллированной водой с рН, равным 6,5. Определение рН растворов гипсового вяжущего и отхода производства базальтовых волокон производилось на кондуктометрическом анализаторе жидкости Мультигест КСЛ.

Содержание компонентов ГВ/ПЦ/БП в данном исследовании было принято постоянным – 85/10/5 соответственно, в мас. %. Данное соотношение было назначено по результатам предыдущих исследований. Водотвердое отношение было принято равным нормальной густоте модифицированного гипсового теста, соответствующей распылу лепешки на вискозиметре Суттарда, равной 18 см.

Исследования основных физико-механических свойств модифицированных гипсовых композитов

Таблица 3
Table 3

Физико-механические свойства гипсоцементных композиций с добавкой активированного базальтового отхода
The physical-mechanical properties of gypsum cement compositions with the activated basalt waste addition

№	Состав вяжущего, мас. %			В/Т	Помол	Очистка	$\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	$\Gamma_{\text{ср}}$, %	$R_{\text{сж.ср}}$, МПа
	ГВ	ПЦ	БП						
1	85	10	5	0,6	+	+	1158	46	12,8
2					+	–	1081	46	12,5
3					–	+	1155	48	12,9
4					–	–	1033	46	12,7

проводились в соответствии с ГОСТ 23789–18 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний», ГОСТ 8462–85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе».

Смеси готовились путем перемешивания ручной мешалкой гипсового вяжущего, портландцемента, отхода производства базальтовых волокон и дальнейшего затворения сухого порошка гомогенного состава дистиллированной водой. Из приготовленного таким образом раствора изготавливались литьевым способом образцы-кубы размером 20×20×20 мм (рис. 2). При этом составы отличались только процессом предварительной подготовки: отход производства базальтовых волокон в отдельных случаях обезжиривался и снова высушивался до постоянной массы, проходил стадию активации в лабораторной планетарной шаровой мельнице «Активатор-2S» в течение 60 с с постепенным нарастанием мощности.

Результаты исследований

Гранулометрический состав применяемого отхода производства базальтовых волокон представлен на рис. 3.

Исследованиями гранулометрического состава базальтового отхода установлено, что измельчение способствует уменьшению среднего размера частиц в составе исходного полимодального порошковидного материала, характеризующегося присутствием грубодисперсных (с модой распределения в области значения диаметра 1000 мкм), средних и высокодисперсных частиц (с модой распределения 10 мкм).

В процессе измельчения происходит изменение интегрального и дифференциального распределения частиц в составе порошка базальтового отхода. Сокращается диапазон распределения частиц по размерам, изменяется его характер, что, по-видимому, в будущем отразится на упаковке частиц в многокомпонентной дисперсной системе, поскольку из литературных данных известно, что распределение частиц по размерам напрямую влияет на механические характеристики смесей [28, 29].

Проведенные исследования показали эффективность активации пылевидного отхода. Введение активированного отхода в количестве 10% от массы гипсового вяжущего позволяет повысить прочность при сжатии получаемого гипсового камня на 10%, в то время как использование отхода в исходном (неактивиро-



Рис. 4. Гипсовое тесто на основе исходного отхода производства базальтовых волокон
Fig. 4. The plaster paste based on the initial waste of basalt fiber production

ванном) состоянии приводит к снижению прочности модифицированного гипсового камня на 20% (рис. 4).

Однако результаты исследований гипсоцементного состава с активированным базальтовым порошком, представленные в табл. 3, иллюстрируют другие закономерности и технические показатели модифицированного камня и по прочности, и по плотности.

Исследования показали, что в процессе активации происходит коагуляция замасливателя (рис. 5), что отражается в большей степени на внешнем виде смесей, чем на прочности и плотности получаемых композитов. Изменение исследованных физико-механических показателей в зависимости от присутствия замасливателя незначительно.

Влияние активации базальтового отхода на прочность и плотность гипсоцементных композиций также не выявлено, что, возможно, объясняется дисбалансом общего гранулометрического состава сырьевой смеси.

Использование фракционированного активированного отхода с подобранным гранулометрическим составом, возможно, позволит в большей мере повысить эффективность активации базальтового отхода в гипсоцементных составах.

Необходимо отметить и влияние оксидного состава базальтового отхода на процесс структурообразования гипсовых и гипсоцементных композитов, модифицированных высокодисперсным базальтовым порошком. Влияние примесей хлоридных солей на процесс



Рис. 5. Гипсовое тесто на основе активированного отхода производства базальтовых волокон без его очистки

Fig. 5. The plaster paste based on the initial waste of basalt fiber production based on activated waste of basalt fiber production without unit cleaning

кристаллизации двуводного гипса требует дополнительных исследований. Вероятно, примеси хлоридов, адсорбируясь на поверхности кристаллов дигидрата, могут менять маршруты кристаллизации, а также способствовать направленному росту тех или иных граней кристаллов. Примеси магния и железа также могут отражаться на размерах и форме кристаллов дигидрата.

Возможно, при введении в состав гипсоцементного композита базальтового отхода эффективность его активации и очистки нивелируется протекающими сложными химическими превращениями в многокомпонентной смеси.

Выводы

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что активация пылевидного отхода

производства базальтовых волокон позволяет изменить его зерновой состав, а также реакционную способность, обеспечив повышенную дисперсность и дефектность структуры, а значит, и химическую активность, и высокую прочность получаемого гипсового камня. Производить дополнительное обезжиривание волокнистого наполнителя, как показали проведенные исследования, нецелесообразно. Активация волокнистого наполнителя в случае использования многокомпонентной смеси с добавкой в состав вяжущего портландцемента не показала прироста прочности и значимого положительного эффекта в целом, что, очевидно, требует дополнительных исследований, в том числе и по подбору зернового состава многокомпонентной сырьевой смеси.

Список литературы

1. Никитин А.В. Непрерывное базальтовое волокно – сейчас и в будущем // *Композитный мир*. 2018. № 5 (80). С. 20–21.
2. Карпесь И. Прогнозы, ожидания и реальность в сфере базальтового волокна // *Композитный мир*. 2018. № 5 (80). С. 36–37.
3. Францев М.Э. Определение целесообразности использования армирующих материалов на основе базальтового волокна при создании отечественных судов из композитов // *Транспортные системы*. 2018. № 1 (7). С. 15–24.
4. Шиляев А.И., Беляев Е.В., Калабеков У.К., Меньшикова Е.А. Диабазы Дагестана – источник сырья для производства базальтового волокна // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2018. № 11–12 (238–239). С. 37–41.
5. Оснос М.С., Оснос С.П. Базальтовые непрерывные волокна – основа для создания новых промышленных производств и широкого применения армирующих и композитных материалов // *Композитный мир*. 2019. № 1 (82). С. 58–65.
6. Матчанова Н.Н. Результаты исследования свойств базальтовых волокон и их структуры. *Advances in Science and Technology: Сб. статей XXV Международной научно-практической конференции*. М., 2019. Ч. 1. С. 125–127.

References

1. Nikitin A.V. Continuous basalt fiber – now and in the future. *Kompozitnyi mir*. 2018. No. 5 (80), pp. 20–21. (In Russian).
2. Karpes'ov I. Basalt fiber forecasts, expectations and reality. *Kompozitnyi mir*. 2018. No. 5 (80), pp. 36–37. (In Russian).
3. Frantsev M.E. Determination of the feasibility of using basalt fiber based reinforcing materials in the creation of domestic ships made of composites. *Transportnye sistemy*. 2018. No. 1 (7), pp. 15–24. (In Russian).
4. Shilyaev A.I., Belyaev E.V., Kalabekov U.K., Men'shikova E.A. Diabases of Dagestan – a source of raw materials for the production of basalt fiber. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2018. No. 11–12 (238–239), pp. 37–41. (In Russian).
5. Osnos M.S., Osnos S.P. Basalt continuous fibers – the basis for the creation of new industrial industries and the wide use of reinforcing and composite materials. *Kompozitnyi mir*. 2019. No. 1 (82), pp. 58–65. (In Russian).
6. Matchanova N.N. The results of the study of the properties of basalt fibers and their structure. *Advances in Science and Technology: Collection of articles of the XXV International Scientific and Practical Conference*. Moscow. 2019. Part 1, pp. 125–127. (In Russian).

7. Гигинейшвили Д.Я., Кристесяшвили Е.Н. Непрерывное базальтовое волокно и перспективы их широкомасштабного применения. Результаты исследований за 40 лет. *Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности: Сб. научных трудов международного научно-технического симпозиума и международного Косыгинского форума*. М., 2019. С. 24–29.
8. Васильева А.А., Павлова М.С. Получение базальтового непрерывного волокна на основе базальта Васильевского месторождения // *Техника и технология силикатов*. 2019. Т. 26. № 4. С. 111–114.
9. Оснос С.П. Применение материалов из базальтовых пород в автомобильной промышленности // *Композитный мир*. 2020. № 1 (88). С. 46–51.
10. Патент РФ 2695188. *Устройство изготовления непрерывных базальтовых волокон* / Строгонов К.В., Назаров М.Н. Заявл. 07.06.2018. Опубл. 22.07.2019. Бюл. № 21.
11. Патент РФ 2561070. *Способ производства базальтовых волокон и оборудование для их изготовления* / Безлаковский А.И., Дубовый В.К., Петунов В.Т., Черняков Р.Г. Заявл. 15.10.2013. Опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
12. Казымов К.П., Манькова Т.В., Бражкина Т.В., Меньшикова Е.А., Исаева Г.А. Исследования сырья ООО «Вулкан» для производства непрерывного базальтового волокна // *Базальтовые технологии*. 2012. № 1. С. 18–20.
13. Пономарев В.Б., Громков Б.К., Орешко С.М., Чебрыakov С.Г. Технология производства базальтового непрерывного волокна // *Базальтовые технологии*. 2013. № 2. С. 47–50.
14. Шаталов А.В., Севостьянов В.С., Шаталов В.А. Возможные пути решения переработки отходов производства изделий из базальтового волокна. *Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: Материалы докладов Международной научно-технической конференции*. Алушта, 2018. С. 195–200.
15. Белов В.В., Абрамов Д.Г. Статистические характеристики прочностных показателей фибробетона на местных отходах базальтовой ваты // *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2018. № 1. С. 626–629.
16. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Соловьев В.Н., Петропавловский К.С. Утилизация отходов минерального волокна в производстве гипсовых изделий // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1392–1398.
17. Кузьмичева И.Г. Фибробетон с базальтовым волокном. *Проектирование и строительство: Сб. научных трудов 2-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров*. Курск, 2018. С. 91–94.
18. Okolnikova G.E., Yen K., Gazizova S.A., Kurbanmagomedov A.K. Usability of basalt fibers in
7. Gigineishvili D.Ya., Kristesyashvili E.N. Continuous basalt fiber and prospects for its wide-scale application. Research results over 40 years. *Modern Engineering Problems of Key Industries: Collection of Scientific Works of the International Scientific and Technical Symposium and the International Kosygin Forum*. Moscow. 2019, pp. 24–29. (In Russian).
8. Vasil'eva A.A., Pavlova M.S. Production of basalt continuous fiber based on basalt of Vasilyevsky deposit. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2019. T. 26. No. 4, pp. 111–114. (In Russian).
9. Osnos S.P. Application of basalt rock materials in the automotive industry. *Kompozitnyi mir*. 2020. No. 1 (88), pp. 46–51. (In Russian).
10. Patent RF 2695188. *Ustroistvo izgotovleniya nepre-ryvnykh bazal'tovykh volokon* [Device for production of continuous basalt fibres]. Strogonov K.V., Nazarov M.N. Declared 07.06.2018. Published 22.07.2019. Bulletin No. 21. (In Russian).
11. Patent RF 2561070. *Sposob proizvodstva bazal'tovykh volokon i oborudovanie dlya ikh izgotovleniya* [Method of production of basalt fibres and equipment for their manufacture]. Bezlakovskii A.I., Dubovyi V.K., Petunov V.T., Chernyakov R.G. Declared 15.10.2013. Published 20.08.2015. Bulletin No. 23. (In Russian).
12. Kazymov K.P., Man'kova T.V., Brazhkina T.V., Men'shikova E.A., Isaeva G.A. Research of raw materials of LLC Vulcan for the production of continuous basalt fiber. *Bazal'tovye tekhnologii*. 2012. No. 1, pp.18–20. (In Russian).
13. Ponomarev V.B., Gromkov B.K., Oreshko S.M., Chebryakov S.G. Basalt continuous fiber manufacturing technology. *Bazal'tovye tekhnologii*. 2013. No. 2, pp. 47–50. (In Russian).
14. Shatalov A.V., Sevost'yanov V.S., Shatalov V.A. Possible solutions for processing waste from basalt fiber products. *Innovative ways to solve topical problems of environmental management and protection: Reports of the International Scientific and Technical Conference*. Alushta. 2018, pp. 195–200. (In Russian).
15. Belov V.V., Abramov D.G. Statistical characteristics of strength indices of fibrobeton on local waste of basalt wool. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii*. 2018. No. 1, pp. 626–629. (In Russian).
16. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Bur'yanov A.F., Solov'ev V.N., Petropavlovskii K.S. Disposal of mineral fibre wastes in the production of gypsum products. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. No. 12 (111), pp.1392–1398. (In Russian).
17. Kuz'micheva I.G. Fibrobeton with basalt fiber. Design and construction: *Collection of scientific works of the 2nd International Scientific and Practical Conference of young scientists, graduate students, masters and bachelors*. Kursk. 2018, pp. 91–94. (In Russian).
18. Okolnikova G.E., Yen K., Gazizova S.A., Kurbanmagomedov A.K. Usability of basalt fibers in reinforced concrete. *Sistemnye tekhnologii*. 2019. No. 2 (31), pp. 9–14. (In Russian).

- reinforced concrete // *Системные технологии*. 2019. № 2 (31). С. 9–14.
19. Chiadighikaobi P.Ch., Emiri D.A. Basalt chopped fiber: a solution to cracks in concrete // *Наука и бизнес: пути развития*. 2018. № 11 (89). С. 129–132.
 20. Шляхова Е.И., Левчук Н.В. Применение базальтового волокна в бетонных композиционных системах // *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2018. № 10. С. 170–174.
 21. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Буянтуев С.Л., Ветошкин И.В., Логинова А.Б. Фибробетон на основе базальтовых волокон, композиционных вяжущих и нанокремнезема // *Наукоемкие технологии и инновации: Сб. докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова*. Белгород, 2019. С. 383–387.
 22. Боровских И.В., Хохряков О.В., Кашаев Э.Ф. Химическое взаимодействие базальтового волокна с продуктами гидратации цемента // *Инновационная наука*. 2015. № 7–1 (7). С. 14–16.
 23. Ван Я., Ян Ч., Ван Н., Чжан Т.Т., Яо Ф. Экспериментальное исследование механизма разрушения цементного раствора, армированного базальтовым волокном, основанное на вейвлет-анализе энергетического спектра акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 22–31.
 24. Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Абдиев М.С., Сопубеков Н.А. Разработка технологии получения гипсобазальтовых композитов // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2019. Т. 19. № 8. С. 102–105.
 25. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Petropavlovskii K., Buryanov A., Novichenkova T., Pustovgar A. Role of basalt dust in the formation of the modified gypsum structure. *MATEC Web of Conferences: 22nd International scientific conference on construction the formation of living environment, FORM 2019*. pp. 02036. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702036
 26. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Завадко М.Ю., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П., Петропавловский К.С. Применение пылевидных отходов базальтового производства в качестве наполнителя гипсовых композиций // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 9–13.
 27. Патент РФ 2682818. *Способ приготовления замасливателя для базальтового волокна* / Миславский Б.В. Заявл. 07.02.2018. Оpubл. 21.03.2019. Бюл. № 9.
 28. 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.
 29. Mendes T.M., Guerra L., Morales G. Basalt waste added to Portland cement // *Acta Scientiarum Technology*. 2016. 38 (4). DOI: 10.4025/actascitechnol.v38i4.27290
 19. Chiadighikaobi P.Ch., Emiri D.A. Basalt chopped fiber: a solution to cracks in concrete. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2018. No. 11 (89), pp.129–132.
 20. Shlyakhova E.I., Levchuk N.V. Applications of basalt fiber in concrete composite systems. *Resurso-energoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2018. No. 10, pp.170–174.
 21. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Buyantuev S.L., Vetoshkin I.V., Loginova A.B. Fibrobeton based on basalt fibers, composite binders and nanosilicon. *Knowledge-intensive technologies and innovations: A collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov*. Belgorod. 2019, pp. 383–387. (In Russian).
 22. Borovskikh I.V., Khokhryakov O.V., Kashaev E.F. Chemical interaction of basalt fiber with cement hydration products. *Innovatsionnaya nauka*. 2015. No. 7–1 (7), pp. 14–16. (In Russian).
 23. Van Ya., Yan Ch., Van N., Chzhan T.T., Yao F. Experimental study of the mechanism of breakage of cement grout reinforced with basalt fiber, based on the UV analysis of the energy spectrum of acoustic emission. *Defektoskopiya*. 2020. No. 4, pp. 22–31. (In Russian).
 24. Aidaraliev Zh.K., Kainazarov A.T., Abdiev M.S., Sopubekov N.A. Development of technology for production of gypsum-basalt composites. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta*. 2019. Vol. 19. No. 8, pp. 102–105. (In Russian).
 25. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Petropavlovskii K., Buryanov A., Novichenkova T., Pustovgar A. Role of basalt dust in the formation of the modified gypsum structure. *MATEC Web of Conferences: 22nd International scientific conference on construction the formation of living environment, FORM 2019*. pp. 02036. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702036
 26. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Zavad'ko M.Yu., Buryanov A.F., Pustovgar A.P., Petropavlovskii K.S. Application of dust wastes of basalt production as filler of gypsum compositions. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 9–13. (In Russian).
 27. Patent RF 2682818. *Sposob prigotovleniya zamaslivate-lya dlya bazal'tovogo volokna* [Method of preparation of lubricant for basalt fibre]. Mislavskii B.V. Declared 07.02.2018. Published 21.03.2019. Bulletin No. 9. (In Russian).
 28. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Belov V.V., Bur'yanov A.F. Granulometric composition as a criterion for controlling the properties of disperse systems. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 1, pp. 64–65. (In Russian).
 29. Mendes T.M., Guerra L., Morales G. Basalt waste added to Portland cement. *Acta Scientiarum Technology*. 2016. 38 (4). DOI: 10.4025/actascitechnol.v38i4.27290

Н.С. РУЗИНА, магистр (аспирант) (Nata.Ruzina@mail.ru), Г.И. ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук (gyakov@istu.ru), А.Ф. ГОРДИНА, канд. техн. наук (afspirit@rambler.ru), Г.Н. ПЕРВУШИН, д-р техн. наук (pervushin61@yandex.ru), Ю.А. СЕМЁНОВА, студентка (JullySum@yandex.ru), Е.В. БЕГУНОВА, магистр (аспирант) (ekb.18@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова
(426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

Модификация вяжущих на основе сульфата кальция комплексными добавками

Приведено исследование влияния комплексных добавок на свойства гипсовых вяжущих. В работе были использованы такие добавки, как диабазовая мука, металлургический шлак, а также портландцемент. Выявлено, что в результате проведения физико-механических испытаний модификация гипсового вяжущего комплексной добавкой, состоящей из диабаза (0,1%) и портландцемента (1%), показала большую эффективность в повышении прочностных характеристик материала. Рост прочности при сжатии на 28-е сут составил 23% в сравнении с контрольным составом. Введение в состав гипсового вяжущего металлургического шлака (0,2%) в комплексе с портландцементом (3%) привело к увеличению прочности при сжатии на 19,2% в сравнении с контрольным образцом. Физико-химические исследования модифицированных материалов показали, что при введении комплексных добавок в структуру материалов формируются новообразования на основе гидросульфалюминатов (при введении диабазовой муки) и гидросиликатов кальция (при использовании металлургического шлака), которые приводят к дополнительному связыванию кристаллогидратов гипса и уплотнению морфологии, что обеспечивает улучшение механических свойств матрицы.

Ключевые слова: вяжущие на основе сульфата кальция, модификаторы, добавки, диабазовая мука, металлургический шлак, портландцемент, механические характеристики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ИжГТУ им. М.Т. Калашникова в рамках научного проекта № ГАФ/20-67-22.

Для цитирования: Рузина Н.С., Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Первущин Г.Н., Семёнова Ю.А., Бегунова Е.В. Модификация вяжущих на основе сульфата кальция комплексными добавками // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 18–22.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-18-22>

N.S. RUZINA, Master (graduate student) (Nata.Ruzina@mail.ru), G.I. YAKOVLEV, Doctor of Sciences (Engineering) (gyakov@istu.ru), A.F. GORDINA, Candidate of Sciences (Engineering) (afspirit@rambler.ru), G.N. PERVUSHIN, Doctor of Sciences (Engineering) (pervushin61@yandex.ru), Yu.A. SEMENOVA, Student (JullySum@yandex.ru), E.V. BEGUNOVA, Master (graduate student) Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, Russian Federation)

Modification of Binders Based on Calcium Sulfate with Complex Additives

The study of the effect of complex additives on the properties of gypsum binders is presented. Such additives as diabasic flour, metallurgical slag, and Portland cement were used in the work. It was revealed that as a result of physical and mechanical tests, modification of gypsum binder with a complex additive consisting of diabase (0.1%) and Portland cement (1%) showed greater efficiency in increasing the strength characteristics of the material. The increase in compressive strength for 28 days was 23% compared to the control composition. The introduction of metallurgical slag (0.2%) into the gypsum binder in combination with Portland cement (3%) resulted in an increase in compressive strength by 19.2% compared to the control sample. Physical and chemical studies of modified materials show that when complex additives are introduced in the structure of materials, new growths are formed on the basis of hydrosulfoaluminates (when diabasic flour is introduced) and calcium hydrosilicates (when metallurgical slag is used), which lead to additional binding of gypsum crystalline hydrates and compaction of morphology, which improves the mechanical properties of the matrix.

Keywords: calcium sulfate-based binders, modifiers, additives, diabasic flour, metallurgical slag, Portland cement, mechanical characteristics.

The work was carried out at the financial support by Kalashnikov Izhevsk State Technical University within the framework of the grant No. ГАФ/20-67-22.

For citation: Ruzina N.S., Yakovlev G.I., Gordina A.F., Pervushin G.N., Semenova Yu.A., Begunova E.V. Modification of binders based on calcium sulfate with complex additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 18–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-18-22>

Стремительное развитие технологий и процессов строительства диктует новые, более строгие требования к качеству используемых материалов. Создание достаточно прочных и водостойких изделий на основе гипсовых вяжущих невозможно без регулирования их структуры и свойств. Разработка новых составов на основе сульфата кальция с введением модифицирующих добавок природного и техногенного происхождения, повышающих физико-механические и технологические характеристики материалов, является актуальным

направлением в области изучения и использования гипсовых вяжущих [1, 2].

В настоящий момент существует множество различных исследований, направленных на получение улучшенных гипсовых материалов, отвечающих современным требованиям [3, 4 и др.]. С этой целью в состав смеси вводятся как индивидуальные, так и комплексные добавки. Анализ существующих разработок показал, что наиболее эффективно введение непосредственно комплекса минеральных добавок, которые в совокупности приводят к улучшению ряда

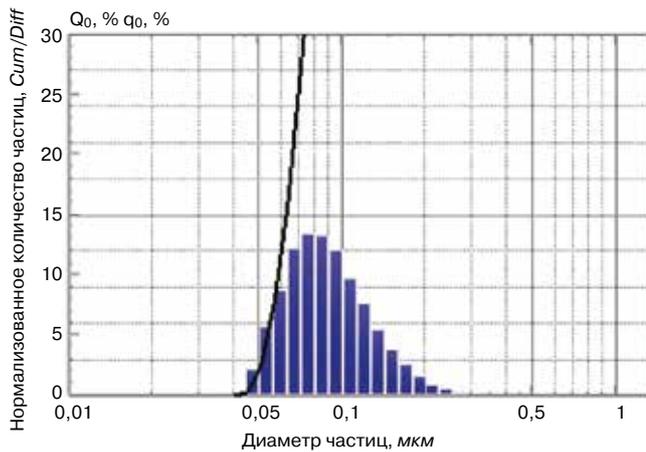


Рис. 1. Дисперсный анализ диабаза
Fig. 1. Dispersion analysis of diabase

свойств гипсовых материалов. Так, рядом ученых [5, 6] было предложено введение в гипсовое вяжущее комплексной добавки, содержащей 20–30% керамзитовой пыли, до 30% молотых доменных шлаков, известь и суперпластификатор, что позволило получить материал с плотной структурой, отличающейся повышенной водостойкостью. К.Б. Васнецовой [7] предложен способ повышения физико-технических характеристик гипсового вяжущего путем введения 15–25% феррохромового шлака и 1–5% негашеной извести. Результатом явилось повышение водостойкости на 10–30% и ускорение твердения композиции. Роста прочностных характеристик и снижения водопоглощения гипсового вяжущего также удалось добиться посредством совместного введения керамзитовой пыли и доменного шлака [8].

Эффективным является введение минеральных добавок совместно с портландцементом благодаря химическому составу цемента и взаимодействию с компонентами добавок и вяжущего. А.В. Волженским и другими исследователями [9, 10] было разработано смешанное вяжущее, состоящее из гипса (50–70%), портландцемента (15–25%) и активной минеральной добавки (10–25%), названное гипсоцементно-пуццо-

лановым вяжущим (ГЦПВ). Данные вяжущие обладают свойствами гипса, такими как быстрые сроки схватывания и набор прочности, и способны к гидравлическому твердению подобно цементам [11]. При создании сульфатных вяжущих также широко применяют техногенные отходы производств, например горелые породы (глиежи). В состав сульфатно-глинистых вяжущих входят двухводный гипс 55–65%, горелая порода 20–40% и портландцемент 10–15%. Длительный и интенсивный рост прочности образцов наблюдается во влажных условиях, также прочность повышается посредством тепловлажностной обработки [12]. Результаты исследований, приведенные в [13], показали, что смесь, состоящая из 55–60% гипса, 25–30% портландцемента и 15–18% силикагеля, является водостойкой с коэффициентом размягчения 0,81–0,86. В.Т. Ерофеевым и В.А. Спириным [14] был предложен следующий состав гипсоцементно-пуццоланового вяжущего: полуводный гипс 45–50%; портландцемент 13–15%; диатомит 13–15%. Результатом явилось повышение прочности материала и приобретение им фунгицидных свойств.

Целью данной работы явилось исследование влияния комплексных минеральных добавок, включающих пуццолановый и щелочной компоненты, на структуру и свойства гипсового вяжущего, поскольку данное направление является перспективным и актуальным для изучения.

В ходе исследования свойств материалов на основе сульфата кальция было принято решение об использовании в качестве модификаторов диабаза (дисперсионный анализ представлен на рис. 1) и металлургического шлака Надеждинского металлургического завода в сочетании с портландцементом.

Анализируя результаты дисперсионного анализа диабаза (рис. 1), можно сделать вывод, что в нем для 50% частиц средний размер составляет 0,087 мкм; для 75% – 0,112 мкм; для 95% – 0,168 мкм. Инфракрасный анализ диабаза (рис. 2, а) показал наличие следующих группировок: валентные колебания ОН-групп (3000–3600 см⁻¹); деформационные колебания H₂O

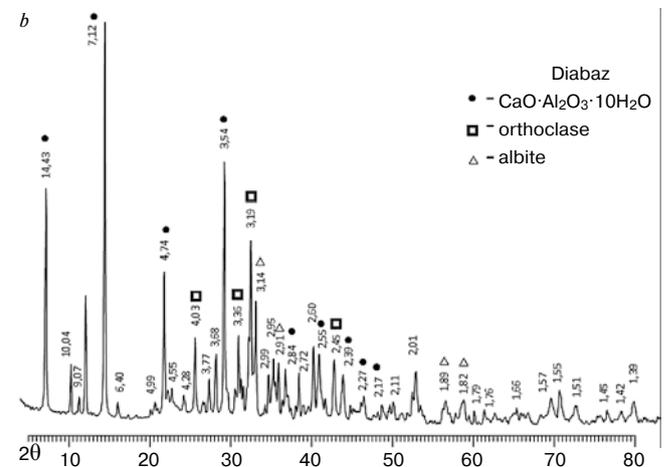
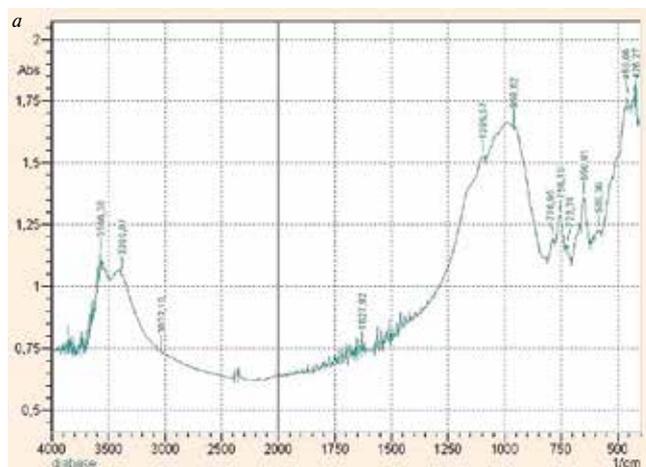


Рис. 2. Анализ химического состава диабазовой муки: а – ИК-спектральный; б – рентгенофазовый
Fig. 2. Analysis of diabase flour chemical composition: а – Infrared analysis; б – X-ray diffraction analysis

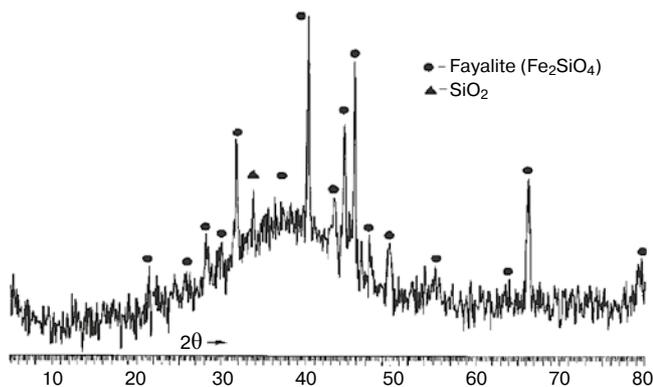


Рис. 3. Рентгенофазовый анализ металлургического шлака
Fig. 3. X-ray diffraction analysis of metallurgical slag

(1600–1700 см⁻¹); O–Si–O (900–1100 см⁻¹ (основной); 600–800 см⁻¹ (дублирующий)); оксиды металлов (400–500 см⁻¹). Минералогический состав диабаза (рис. 2, b) представлен десятиводным однокальциевым алюминатом, ортоклазом и альбитом.

Дисперсионный анализ металлургического шлака показал, что более 90% частиц добавки находится в диапазоне менее 95 мкм. Минералогический состав гранулированного шлака (рис. 3) представлен фаялитом (железистым оливином), также присутствует оксид кремния. Шлак наряду с кристаллической фазой имеет аморфную составляющую. В исследованиях рассматривалось влияние минеральных добавок, в составе которых в значительном количестве содержится оксид кремния.

Для установления закономерности влияния добавок на структуру и свойства вяжущего на основе сульфата кальция были выбраны концентрации с учетом результатов дисперсионного анализа частиц, %: 0,05; 0,1; 0,5 (для диабаза); 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 (для шлака) и 0–3 (для портландцемента).

Ранее проведенные исследования [15] показали, что оптимальная концентрация диабаза и металлургического шлака при их использовании в качестве монодобавки составляет 0,1 и 0,2% от массы вяжущего соответственно. Проведенные испытания под-

твердили возможность использования минеральных компонентов в качестве модификаторов. Однако введение добавок эффективно только на ранних этапах твердения (до 7 сут), при этом отмечается выравнивание механических характеристик с контрольным составом к 28 сут хранениям.

Для создания благоприятных условий гидратации и твердения гипсовой матрицы с возможностью образования малорастворимых в воде продуктов было принято решение о введении в состав минерального модификатора совместно с портландцементом. Результаты физико-механических испытаний композиций на 28-е сут твердения приведены на рис. 4.

Комплексное введение цемента (1%) и диабаза (0,1%) обеспечивает прирост прочности при сжатии гипсовой композиции до 23% в сравнении с контрольным составом, что обусловлено уплотнением структуры аморфной фазой, включающей гидросиликаты и гидросульфалюминаты кальция (этtringит) [1]. Оптимальное содержание портландцемента при совместном введении с металлургическим шлаком составляет 3% от массы вяжущего, прирост прочности – 19,2% по сравнению с контрольным составом. К росту прочности приводит формирование новообразований на основе гидросульфалюминатов кальция при наличии в составе композиции диабаза и на основе гидросиликатов кальция в присутствии шлака, цементирующих крупные кристаллы двуводрата сульфата кальция и способствующих уплотнению структуры.

Различное содержание модификаторов обусловлено разной степенью дисперсности добавок: диабазовая мука характеризуется большей удельной поверхностью в сравнении с металлургическим шлаком, это обеспечивает ее активное взаимодействие с сульфатами кальция и компонентами цемента, что позволяет снизить концентрацию цемента в системе.

Проведенный ИК-спектральный анализ контрольного состава позволил установить характеристические волновые числа основных группировок гипсового камня, такие как: симметричные и асимметричные валентные колебания ОН-групп (волновые числа

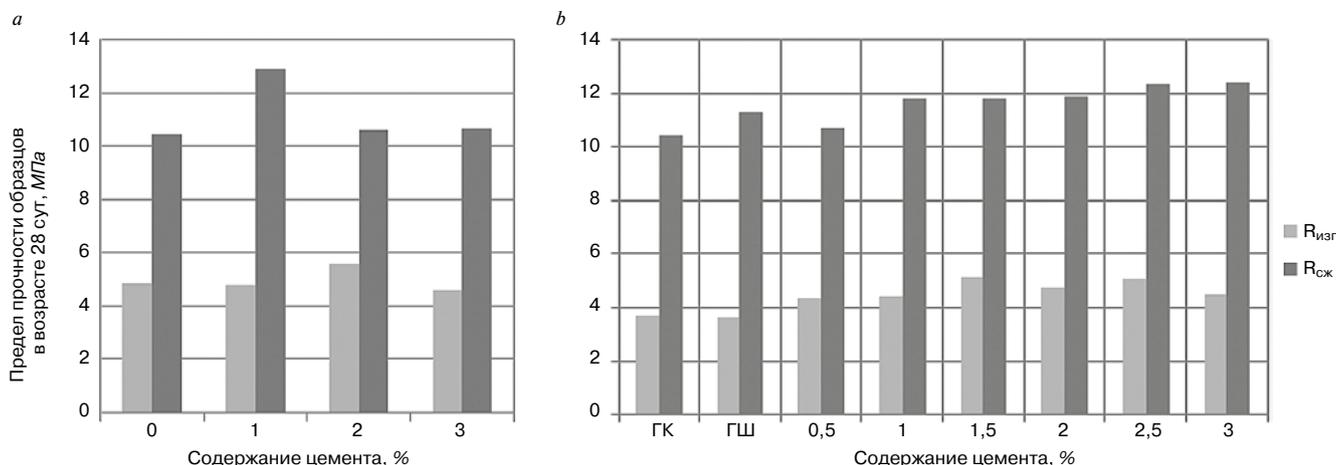


Рис. 4. Физико-механические свойства гипсовой композиции на 28-е сут твердения при варьировании содержания цемента: а – с содержанием 0,1% диабаза; б – с содержанием 0,2% шлака

Fig. 4. Mechanical properties of gypsum compositions after 28 days curing with different variations of cement content: а – with 0.1% of diabasite; б – with 0.2% of slag

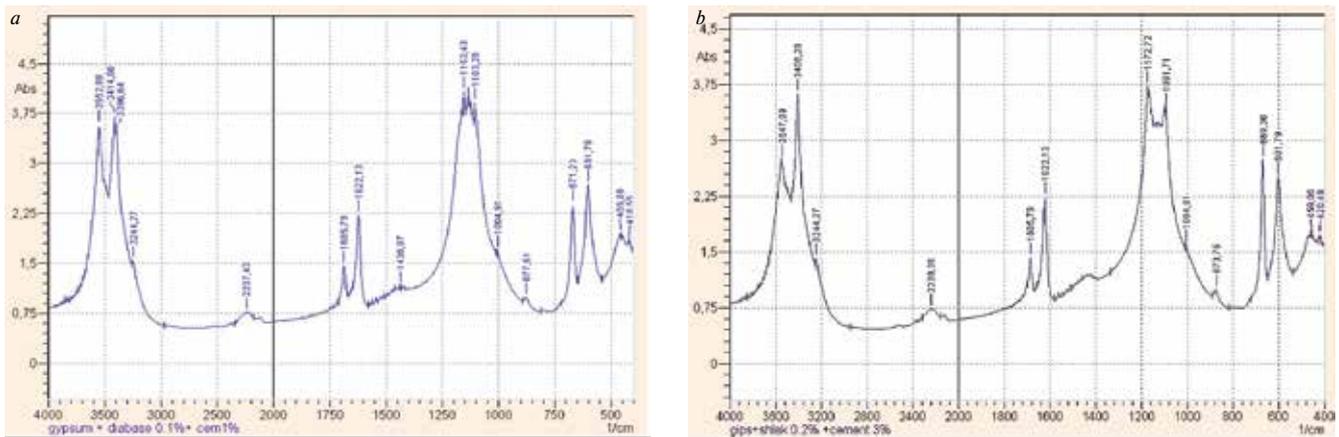


Рис. 5. ИК-спектр гипсовых композиций: *a* – с содержанием диабаза (0,1%) и цемента (1%); *b* – с содержанием шлака (0,2%) и цемента (3%)
 Fig. 5. Infrared spectrum of gypsum compositions: *a* – with diabase (0.1%) and cement (1%); *b* – with slag (0.2%) and cement (3%)

3200–3600 cm^{-1}), деформационные колебания молекул H_2O (1685,79; 1620,21 cm^{-1}); сульфатные группы SO_4^{2-} (1190,08 и 1080,14 cm^{-1} (сильные), 1004,91, 671,23, 601,79 cm^{-1} (слабые)); карбонатные CO_3^{2-} (~1435 и 877,51 cm^{-1}), оксиды металлов (462,92 cm^{-1}).

При введении в состав гипсового вяжущего комплекса добавок наблюдается смещение волновых чисел в случае использования диабаза с 1080,14 на 1103,28 cm^{-1} и появление пика с волновым числом 1153,43 cm^{-1} , что обусловлено формированием новообразований на основе гидросульфатоалюминатов кальция. Меняется также характер и интенсивность пика, связанного с колебаниями сульфатных группировок (рис. 5). Изменения на спектрах составов, модифицированных шлаком, могут быть объяснены наличием в составе продуктов гидратации новообразований на основе гидросиликатов кальция, поскольку силикатные группировки имеют характерные волновые числа в диапазоне, близком к сульфатным группам.

Для подтверждения результатов ИК-спектрального анализа были проведены исследования посредством дифференциально-сканирующей калориметрии на приборе TGA/DSC1 компании METTLER TOLEDO. Съемка проводилась в диапазоне температуры 60–1100°C со скоростью нагрева 30°C/мин. Спектральная информация модифицированных образцов позволила подтвердить ранее сделанные выводы, поскольку общая потеря массы контрольного об-

разца составила 21,4%; при введении диабаза и цемента она составила 19,7%; при совместном добавлении шлака и цемента – 21%; при этом наблюдается рост потери массы в диапазоне температуры 800–900°C, связанный с разложением карбоната и гидросиликатов кальция и уменьшением массы дегидратации в диапазоне температуры 150–200°C.

Таким образом, в результате проведения физико-механических испытаний модификация гипсового вяжущего комплексной добавкой, состоящей из диабаза (0,1%) и портландцемента (1%), показала большую эффективность в повышении прочностных характеристик материала. Рост прочности при сжатии на 28-е сут составил 23% в сравнении с контрольным составом. Введение в состав гипсового вяжущего металлургического шлака (0,2%) в комплексе с портландцементом (3%) привело к увеличению прочности при сжатии на 19,2% в сравнении с контрольным образцом. Физико-химические исследования модифицированных материалов показали, что при введении комплексных добавок в структуре материалов формируются новообразования на основе гидросульфатоалюминатов (при введении диабазовой муки) и гидросиликатов кальция (при использовании металлургического шлака), которые приводят к дополнительному связыванию кристаллогидратов гипса и уплотнению морфологии, что обеспечивает улучшение механических свойств матрицы.

Список литературы

1. Butakova M.D., Gorbunova S.P. Study of the influence of complex additives on properties of the gypsum-cement-puzzolan binder and concretes on its basis // *Procedia Engineering*. 2016. No. 150, pp. 1461–1467. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.082>
2. Singh N.B., Middendorf B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2007. Vol. 53. Iss. 1, pp. 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2007.01.002>
3. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облегченный гипсовый материал с по-

References

1. Butakova M.D., Gorbunova S.P. Study of the influence of complex additives on properties of the gypsum-cement-puzzolan binder and concretes on its basis. *Procedia Engineering*. 2016. No. 150, pp. 1461–1467. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.082>
2. Singh N.B., Middendorf B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2007. Vol. 53. Iss. 1, pp. 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2007.01.002>
3. Khaev T.E., Tkach E.V., Oreshkin D.V. Modified lightweight gypsum material with hollow glass microspheres

- лыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-753-10-45-50>
4. Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Полянских И.С., Фишер Х.-Б., Рузина Н.С., Шамеева Е.В., Холмогоров М.Е. Гипсовые композиции, модифицированные портландцементом и металлургической пылью // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 76–79.
 5. Халиуллин М.И., Гайфуллин А.Р. Штукатурные сухие смеси на основе композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости компонентов // *Известия КазГАСУ*. 2010. № 2. С. 292–296.
 6. Рахимов Р.З., Халиуллин М.И., Гайфуллин А.Р. Композиционные гипсовые вяжущие с использованием керамзитовой пыли и доменных шлаков // *Строительные материалы*. 2012. № 7. С. 13–15.
 7. Патент РФ 2252202. Гипсовое вяжущее / Васнецова К.Б., Окунев А.И., Уфимцев В.М. Заявл. 03.02.2004. Оpubл. 20.05.2005. Бюл. № 14.
 8. Khaliullin M.I., Rakhimov R.Z., Gayfullin A.R., Stoyanov O.V. Concretes based on no-clinker composite gypsum binder with enhanced water resistance and industrial waste // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 1. С. 172–175.
 9. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества: технологии и свойства. М.: Стройиздат, 1979. 477 с.
 10. Копелянский Г.Д. Стойкость гипсовых вяжущих против влажностных влияний при нормативных и повышенных температурах // *Сборник трудов Росгипса*. 1947. Вып. 4. С. 21–32.
 11. Рузина Н.С., Жуков А.Н. Применение техногенных продуктов в качестве модификаторов свойств минеральных вяжущих и изделий на их основе. *Лучшая научно-исследовательская работа 2020: Сборник статей XXIV Международного научно-исследовательского конкурса*. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение». 2020. С. 27–31.
 12. Патент РФ 2292374. Модифицированное гипсовое вяжущее / Акчурин Х.И., Харимов Н.Х., Мяжитов Р.С. [и др.]. Заявл. 07.12.2004. Оpubл. 27.01.2007. Бюл. № 3.
 13. Патент РФ 2368580. Способ получения гипсоцементно-пуццоланового вяжущего / Черных В.Ф., Косулина Т.П., Альварис Яхья, Солнцева Т.А. [и др.]. Заявл. 06.11.2007. Оpubл. 27.09.2009. Бюл. № 27.
 14. Патент РФ 2377203. Гипсоцементно-пуццолановая композиция / Ерофеев В.Т., Спиринов В.А., Казначеев С.В. [и др.]. Заявл. 29.12.2008. Оpubл. 27.12.2009. Бюл. № 36.
 15. Cáčova M., Kotatkova J., Konakova D. и др. Hygric properties of lime-cement plasters with the addition of a pozzolana // *Procedia Engineering*. 2016. №151. С. 127–132. DOI:10.2495/CMEM-V5-N2-144-153
 - for restoration works. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 10, pp. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-753-10-45-50> (In Russian).
 4. Yakovlev G.I., Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Fisher H.-B., Ruzina N.C., Shameeva E.V., Kholmogorov M.E. Gypsum compositions modified with portland cement and metal lurgic dust. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 76–79. (In Russian).
 5. Khaliullin M.I., Gaifullin A.R. Plaster dry mixtures based on composite gypsum binder with increased water resistance of components. *Izvestiya KazGASU*. 2010. No. 2, pp. 292–296. (In Russian).
 6. Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I., Gaifullin A.R. Composite gypsum binders using ceramic dust and blast furnace slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 13–15. (In Russian).
 7. Patent RF 2252202. Gipsovoe vyazhushchee [Gypsum binder]. Vasnetsova K.B., Okunev A.I., Ufimtsev V.M. Declared 03.02.2004. Published 20.05.2005. Bulletin No. 14. (In Russian).
 8. Khaliullin M.I., Rakhimov R.Z., Gayfullin A.R., Stoyanov O.V. Concretes based on no-clinker composite gypsum binder with enhanced water resistance and industrial waste. *Vestnik technologicheskogo universiteta*. 2015. Vol. 18. No. 1, pp. 172–175.
 9. Volzhenskiy A.V., Burov Y.S., Kolokolnikov V.S. Mineral'nye vyazhushchie veshchestva: (tekhnologii i svoistva) [Mineral binders: (technologies and properties)]. Moscow: Stroyizdat 1979. 477 p.
 10. Kopelyanskiy G.D. Resistance of gypsum binders against humidity effects at standard and elevated temperatures. *Sbornik trudov Rosgipsa*. 1947. Iss. 4, pp. 21–32. (In Russian).
 11. Ruzina N.S., Zhukov A.N. Application of man-made products as modifiers of properties of mineral binders and articles based on them. *Luchshaya nauchno-issledovatel'skayarabota 2020:sbornikstateiXXIVMezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa*. Penza: MCNS «Nauka i Prosveshchenie». 2020. pp. 27–31. (In Russian).
 12. Patent RF 2292374. Modifitsirovannoe gipsovoe vyazhushchee [Modified gypsum binder]. Akchurin H.I., Harimov N.H., Myazhitov R.S. [et al.]. Declared 07.12.2004. Published 27.01.2007. Bulletin No. 3. (In Russian).
 13. Patent RF 2368580. Sposob polucheniya gypsotsementno-putsolanovogo vyazhushchego [Method of producing gypsum-cement-pozzolan binder]. Chernykh V.F., Kosulina T.P., Alvaris Yakh'ya, Solntseva T.A. [et al.]. Declared 06.11.2007. Published 27.09.2009. Bulletin No. 27. (In Russian).
 14. Patent RF 2377203. Gypsotsementno-putsolanovaya kompozitsiya [Gypsum-cement-pozzolan composition] / Erofeev V.T., Spirin V.A., Kaznacheev S.V. [et al.]. Declared 29.12.2008. Published 27.12.2009. Bulletin No. 36. (In Russian).
 15. Cáčova M., Kotatkova J., Konakova D. Hygric properties of lime-cement plasters with the addition of a pozzolana. *Procedia Engineering*. 2016. No. 151, pp. 127–132. DOI:10.2495/CMEM-V5-N2-144-153

Ю.Г. МЕЩЕРЯКОВ¹, д-р техн. наук (JGMescheryakov@rosatomtech.spb.ru),
С.В. ФЁДОРОВ¹, канд. техн. наук (SVFedorov@rosatomtech.spb.ru);
В.П. СУЧКОВ², д-р техн. наук (sert@nngasu.ru)

¹ АНО ДПО «Техническая академия Росатома», Санкт-Петербургский филиал (197348, г. Санкт-Петербург, ул. Аэродромная ул., 4, лит. А)

² Нижегородский архитектурно-строительный университет (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65)

Влияние условий дегидратации гипса и фосфогипса на структуру и технические свойства вяжущего

Технологические процессы производства гипсовых и ангидритовых вяжущих (сухой процесс) можно разделить на три основные группы, различающиеся скоростью процессов дегидратации сырья и, как следствие, продолжительностью тепловой обработки: обжиг сырья в виде щебня в сушильных барабанах или вращающихся печах, обжиг в гипсоварочных котлах (бесконечный обогрев) и обжиг гипсового сырья во взвешенном состоянии (мельницах, аппаратах кипящего слоя и др.). Обжиг гипсового сырья во взвешенном состоянии характеризуется высокой скоростью процессов дегидратации. Скоростной обжиг (техноудар) приводит к образованию гетерогенного продукта, состоящего из метастабильных сульфатов кальция. Прямой тепло- и массообмен с теплоносителем позволяет существенно ускорить процессы обжига и понизить удельный расход топлива и энергии. Повышение температуры в зоне реакции, увеличение скорости процессов дегидратации оказывают влияние на технические свойства гипсового вяжущего. Исследовались влияния условий дегидратации сырья и процессов искусственного ускоренного старения на технические свойства вяжущего. Другой целью эксперимента являлось определение кинетики дегидратации гипса и фосфогипса для оптимизации процессов дегидратации и снижению водопотребности формовочных смесей. Практическими результатами исследования следует считать обоснование необходимости искусственного старения и количественную оценку его воздействия на качество вяжущего. Рекомендуется продолжение исследования с целью оптимизации процессов дегидратации.

Ключевые слова: вяжущие, гипс, фосфогипс, скорость процессов дегидратации, дефекты кристаллических структур, влияние на морфологию, старение.

Для цитирования: Мещеряков Ю.Г., Фёдоров С.В., Сучков В.П. Влияние условий дегидратации гипса и фосфогипса на структуру и технические свойства вяжущего // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 23–27.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-23-27>

Yu.G. MESHCHERYAKOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (JGMescheryakov@rosatomtech.spb.ru), S.V. FEDOROV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (SVFedorov@rosatomtech.spb.ru); V.P. SUCHKOV², Doctor of Sciences (Engineering) (sert@nngasu.ru)

¹ Rosatom Technical Academy, Saint-Petersburg branch (4, building A, Aerodromnaya Street, Saint-Petersburg, 197348, Russian Federation)

² Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (65, Ilyinskaya Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation)

Influence of Gypsum and Phosphogypsum Dehydration Conditions on the Structure and Technical Properties of the Binder

Technological processes for the production of gypsum and anhydrite binders (dry process) can be divided into three main groups, which differ in the speed of raw material dehydration processes and, as a result, the duration of heat treatment: roasting raw materials in the form of crushed stone in drying drums or rotating furnaces, roasting in gypsum-cooking boilers (infinite heating) and roasting gypsum raw materials in a suspended state (mills, fluidized bed apparatus, etc.). Roasting of gypsum raw materials in a suspended state is characterized by a high rate of dehydration processes. High-speed roasting (techno-impact) leads to the formation of a heterogeneous product consisting of metastable calcium sulfates. Direct heat and mass exchange with the heat carrier makes it possible to significantly accelerate the roasting process and reduce the specific fuel and energy consumption. Increasing the temperature in the reaction zone, increasing the speed of dehydration processes affect the technical properties of the gypsum binder. The influence of raw material dehydration conditions and artificial accelerated aging processes on the technical properties of the binder was studied. Another goal of the experiment was to determine the kinetics of gypsum and phosphogypsum dehydration in order to optimize the processes of dehydration and reduce the water demand of molding mixtures. The practical results of the study should be considered justification of the need for artificial aging and a quantitative assessment of its impact on the quality of the binder. It is recommended to continue the study in order to optimize the processes of dehydration.

Keywords: binders, gypsum, phosphogypsum, speed of dehydration processes, defects of crystal structures, influence on morphology, aging.

For citation: Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V., Suchkov V.P. Influence of gypsum and phosphogypsum dehydration conditions on the structure and technical properties of the binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 23–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-23-27>

Водопотребность гипсового вяжущего – количество воды, при котором достигается необходимая консистенция (вязкость, сопротивление сдвигу) смеси, измеряется в % от массы вяжущего. По ГОСТ 125–2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия» методика определения водопотребности приблизительно соответствует условиям формования изделий из самоуплотняющихся (текущих) смесей.

Водопотребность гипсового вяжущего, полученного обжигом сырья при атмосферном давлении (β -полу гидрат), влияет на аналогичный показатель формовочных смесей при производстве гипсовых строительных изделий и измеряется в пределах от 45 до 90%, в зависимости от минерального состава сырья и условий производства.

Количество воды, необходимое для превращения полуводного сульфата кальция в гипс при гидрата-

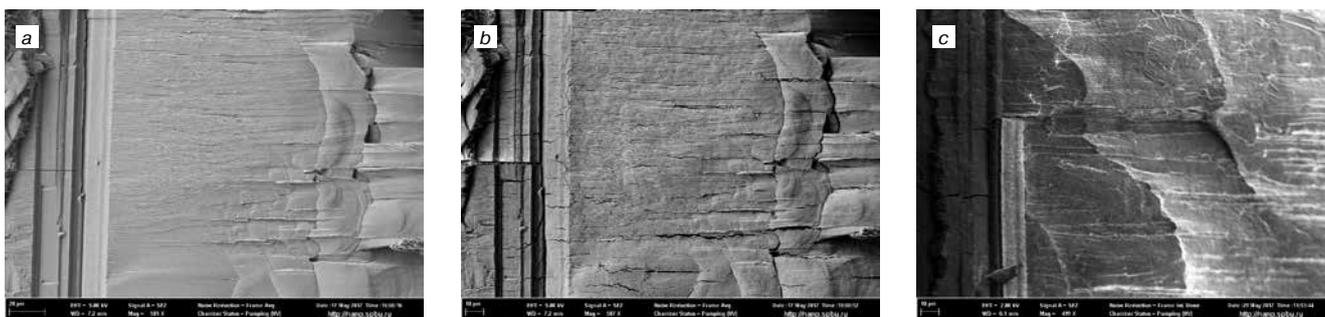


Рис. 1. Медленное нагревание. Гипс Майкопского месторождения: *a* – исходный образец; *b* – после нагревания; *c* – после выдержки над водой
Fig. 1. Slow heating. Gypsum from the Maikop quarry: *a* – initial sample; *b* – after heating; *c* – after keeping above water

ции и твердении смесей, существенно ниже водопотребности, поэтому использование вяжущего с повышенным показателем приводит к увеличению расхода топлива и энергии на сушку изделия либо требует введения добавок-водопонизителей. По ГОСТ 125–2018 высокая водопотребность ограничивает марку гипсового вяжущего.

Сырье состоит преимущественно из минерала гипса $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, имеющего кристаллическую структуру, относящуюся к моноклинной сингонии. Кристаллы гипса имеют слоистое строение, содержат чередующиеся пакеты, состоящие из одного слоя молекул воды и одного двойного слоя CaSO_4 , параллельные плоскости (010) кристалла. Наличие большого неравенства сил связи между пакетами объясняет весьма совершенную слоистость и сильную анизотропию.

Предполагается, что повышенная водопотребность гипсового вяжущего обуславливается образованием открытых пор при выделении химически связанной воды в процессе обжига [1, 2].

Современные способы производства гипсового вяжущего при атмосферном давлении (β -полугидрат) предусматривают тепловую обработку измельченного сырья во взвешенном состоянии при высокой скорости нагревания (термоудар), в том числе при совмещении процессов сушки, помола и дегидратации [3–8]. Опыт работы ассоциации «Волховгипс» показал, что при переработке фосфогипса по этой технологии образуется гипсовое вяжущее со сравнительно высокой водопотребностью [9].

С целью определения влияния условий дегидратации при скоростном обжиге на структуру и техни-

ческие свойства продукта обжига проведено комплексное исследование с использованием двух проб сырья различного происхождения [10]:

1. Гипсовый шпат Майкопского месторождения, пластинчатый гипс, образующий плотные прозрачные кристаллы. Содержание химически связанной воды в пробе – 20,1 мас. %. Гипс обладает весьма совершенной спайностью в плоскости, параллельной одной из осей кристалла (010). Из гипсового шпата изготовлены образцы размером $2 \times 2 \times 6$ мм для электронного микроскопа. Съемка проведена по оси кристалла, перпендикулярной плоскости спайности.

2. Фосфогипс – отход производства ортофосфорной кислоты и минеральных удобрений из кольского апатитового концентрата. Проба фосфогипса отобрана из накопителя АО «Аммофос» (г. Череповец). Содержание химически связанной воды в пробе – 19,7%.

Работа проведена в лаборатории термогравиметрических методов исследования на оборудовании ресурсного центра СПбГУ.

При проведении исследований использован сканирующий электронный микроскоп Zeiss Supra с разрешением 1,3 мкм, позволяющий фиксировать изменение структуры на поверхности образца при нагревании с интервалом 13°C и регистрацией давления в рабочей камере. Максимальная температура нагревательного стола микроскопа – 750°C .

При определении величины и характера деформации при нагревании образцы гипса фиксировались эпоксидным полимером с последующим распределением на пластинки 2 мм в плоскости исследований.

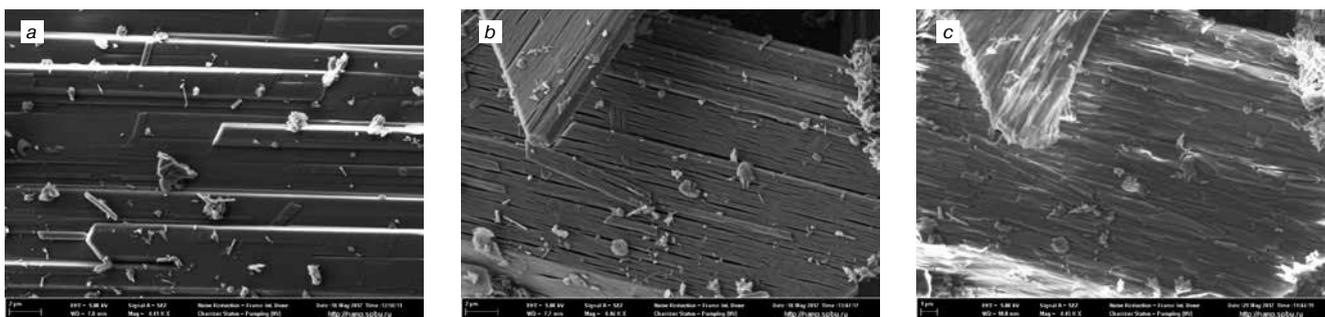


Рис. 2. Фосфогипс: *a* – исходный образец; *b* – после нагревания; *c* – после выдержки над водой
Fig. 2. Phosphorous gypsum: *a* – initial sample; *b* – after heating; *c* – after exposure to water

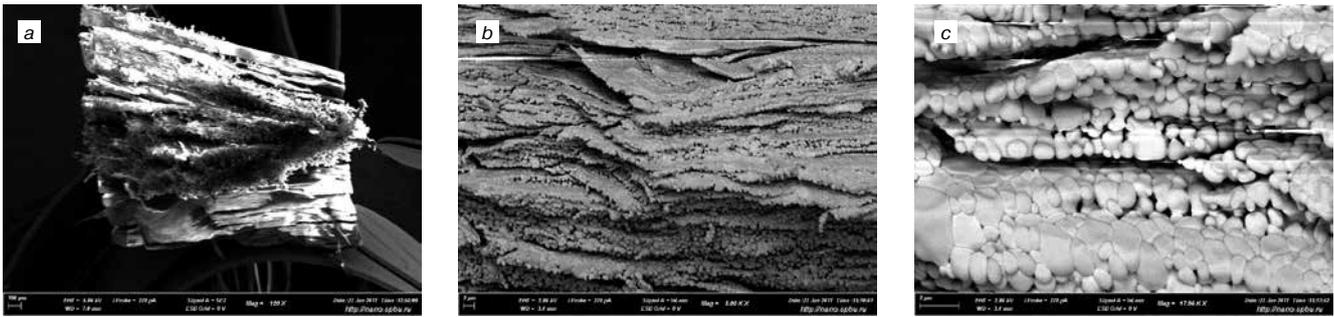


Рис. 3. Быстрое нагревание. Гипс Майкопского месторождения: *a* – исходный образец; *b* – после нагревания; *c* – после выдержки над водой
Fig. 3. Fast heating. Gypsum from the Maikop quarry: *a* – initial sample; *b* – after heating; *c* – after keeping above water

Определение содержания химически связанной воды в новообразованиях на поверхности исследованных образцов выполнено методом количественного рентгеновского микроанализа по изменению содержания атомов кислорода с последующим расчетом.

Нагревание образцов в рабочей камере микроскопа проведено по двум режимам:

1. Сравнительно медленное нагревание со скоростью $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ приблизительно соответствует условиям производства гипсового вяжущего из измельченного сырья в гипсоварочных котлах, а также при обжиге щебня во вращающихся печах.

2. Быстрое нагревание со скоростью $100^{\circ}\text{C}/\text{с}$, продолжительностью 5–7 с (термоудар) приблизительно соответствует условиям переработки сырья во взвешенном состоянии, в том числе при совмещении процессов сушки, помола и обжига.

Микрофотографии проб гипса и фосфогипса до и после обжига приведены на рис. 1; 2; 3, *a* и *b*.

Медленное нагревание. Нагревание природного гипса (рис. 1, *a* и *b*) и фосфогипса (рис. 2, *a* и *b*) приводит к образованию открытых микропор в плоскости, перпендикулярной плоскости спайности кристалла. Фотофиксация позволила установить, что образование пор в условиях опыта происходит в интервале температуры $100\text{--}118^{\circ}\text{C}$ (природный гипс) и $92\text{--}114^{\circ}\text{C}$ (фосфогипс). Деформации расширения образцов в плоскости, перпендикулярной плоскости спайности, зафиксированы в интервале температуры $85\text{--}120^{\circ}\text{C}$ с максимумами при 85 и 115°C (природный гипс). Давление в рабочей камере микроскопа повышается при 125 и 182°C . Термогравиметрический анализ при

соответствующей скорости нагревания позволил зафиксировать изменение массы образцов в интервале температуры $120\text{--}150^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о замедленном выделении водяного пара.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что причиной образования пор являются термические напряжения, в том числе вследствие выделения водяного пара. Повышенная водопотребность гипсового вяжущего может быть обусловлена образованием открытых пор, которые заполняются водой при затворении с сохранением метаморфоз по гипсу. Имобилизованная вода (в порах) незначительно влияет на реологические свойства формовочной смеси, но повышает ее водопотребность.

Нагревание с высокой скоростью. Быстрое нагревание природного гипса (рис. 3, 4, *a* и *b*) приводит к увеличению размеров образца в плоскости, перпендикулярной плоскости слоистости (вспучивание), и частичному разрушению. В производственных условиях эти процессы не имеют практического значения, так как после обжига следует помол крупных зерен в шаровой мельнице.

Нагревание с высокой скоростью изменяет характер фазовых переходов в системе $\text{CaSO}_4\text{--H}_2\text{O}$. Диффузионный массоперенос приводит к образованию зародышей кристаллов новых фаз в форме глобул с максимальным размером частиц до $2,5$ мкм (рис. 3, *b* и 4, *b*).

Рентгеновский микроанализ показал, что при нагревании с высокой скоростью на поверхности зерен образуются новообразования, являющиеся либо полугидратом с пониженным содержанием химически связанной воды (до 80 мас. %), либо растворимым анги-

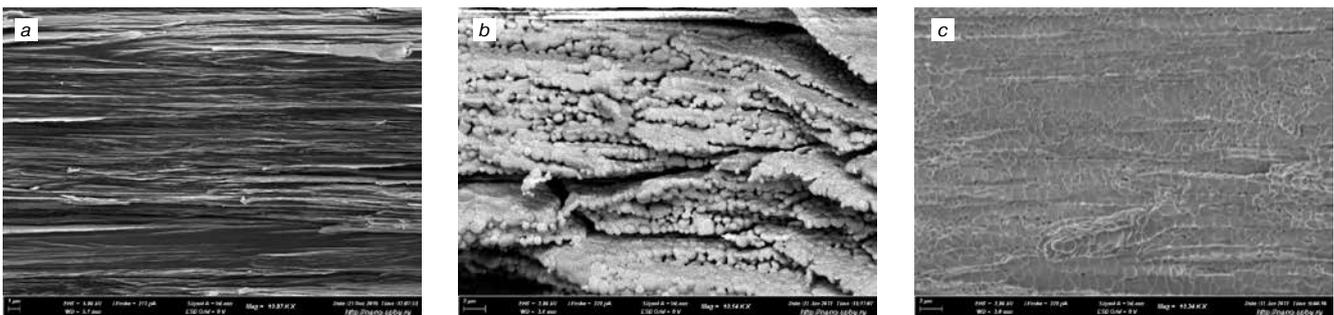


Рис. 4. Фосфогипс: *a* – исходный образец; *b* – после обжига; *c* – после выдержки над водой
Fig. 4. Phosphorous gypsum: *a* – initial sample; *b* – after heating; *c* – after exposure to water

дритом (АШ). Содержание химическисвязанной воды в новообразованиях не превышает 2,2 мас. %.

В этих условиях повышение водопотребности вяжущего может быть обусловлено как образованием открытых пор, так и увеличением удельной поверхности.

Водопотребность гипсового вяжущего изменяется при его хранении в атмосфере влажного воздуха (старение) [11]. Процессы старения можно ускорить путем обработки вяжущего влажным воздухом или водяным паром. Для оценки влияния процессов старения на фазовый состав и микроструктуру после термообработки образцы выдерживались в эксикаторе над водой при температуре 18–20°C в течение 24 ч.

Микрофотографии проб гипса и фосфогипса после обжига и выдержки над водой в течение суток приведены на рис. 1–4, с.

Водопотребность вяжущего из фосфогипса на этот период понизилась с 80 до 71%. Причина сниже-

ния – хемосорбция водяного пара и увеличение объема твердых фаз, а также кольтатаж – заполнение открытых микропор новообразованиями – зародышами кристаллов гипса в форме глобул. Микроанализ с последующим расчетом показал, что глобулы состоят из двуводного сульфата кальция.

Выводы

Приведенные результаты исследований позволяют сделать вывод, имеющий практическое значение. При производстве гипсового вяжущего из измельченного сырья во взвешенном состоянии с целью снижения водопотребности и стабилизации технических свойств вяжущего следует осуществлять операцию искусственного старения [12–15]. В воздухоподогревателе за обжиговым агрегатом (сушильным барабаном, мельницей) следует вводить влажный воздух, обеспечивая максимальное снижение температуры твердых фаз.

Список литературы

1. Мещеряков Ю.Г., Фёдоров С.В. Промышленная переработка фосфогипса. СПб.: Стройиздат, 2007. 102 с.
2. Мещеряков Ю.Г., Фёдоров С.В. Комплексная промышленная переработка хибинского апатитового концентрата. *Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий: Материалы IX Международной научно-практической конференции*. Минск, 2018. С. 124–127.
3. Удалова Е.А., Габитов А.И., Шуваева А.Р., Недосеко И.В., Чернова А.Р., Ямилова В.В. Современное состояние и перспективные возможности использования фосфогипса для производства вяжущих материалов // *История и педагогика естествознания*. 2016. № 4. С. 55–58.
4. Saadaoui E., Ghazel N., Romdhane C.B., Massoudi N. Phosphogypsum: potential uses and problems – a review // *International Journal of Environmental Studies*. No. 74, pp. 558–567. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1330582>
5. Фоменко А.И. Технологии переработки техногенного сырья: Монография. М.: Инфра-Инженерия. 2018. 136 с.
6. Ассакунова Б.Т., Байменова Г.Р., Аманкулов М.А. Композиционные безобжиговые гипсовые вяжущие вещества из местного сырья // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2017. № 10. С. 26–28.
7. Деревянко В.Н., Тельянов В.А. Технологии производства гипсовых вяжущих материалов из фосфогипса // *Вісник ПДАБА*. 2010. № 2–3. С. 143–144.
8. Сучков В.П., Веселов А.В. Механохимическая активация природного и техногенного сырья при производстве высокопрочного гипса. *Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий: Материалы*

References

1. Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V. Promishlennaya pererabotka fosfogipsa [Industrial processing of phosphogypsum]. St. Petersburg: Stroyizdat. 2007. 102 p.
2. Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V. Complex industrial processing of the Khibiny apatite concentrate. *Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products: Materials of the IX International Scientific and Practical Conference*. Minsk. 2018, pp. 124–127. (In Russian).
3. Udalova E.A., Gabitov A.I., Shuvaeva A.R., Nedoseko I.V., Chernova A.R., Yamilova V.V. Current state and promising possibilities of using phosphogypsum for the production of binders. *Istoriya i pedagogika estestvoznaniya*. 2016. No. 4, pp. 55–58. (In Russian).
4. Saadaoui E., Ghazel N., Romdhane C.B., Massoudi N. Phosphogypsum: potential uses and problems – a review. *International Journal of Environmental Studies*. No. 74, pp. 558–567. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1330582>
5. Fomenko A.I. Tekhnologii pererabotki tekhnogenno-go syr'ya: monografiya. [Technologies for processing technogenic raw materials: monograph]. Moscow: Infra-Engineering. 2018. 136 p.
6. Assakunova B.T., Baymenova G.R., Amankulov M.A. Composite non-fired gypsum binders from local raw materials. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana*. 2017. No. 10, pp. 26–28. (In Russian).
7. Derevianko V.N., Telyanov V.A. Technologies for the production of gypsum binders from phosphogypsum. *Visnik PDABA*. 2010. No. 2–3, pp. 143–144. (In Russian).
8. Suchkov V.P., Veselov A.V. Mechanochemical activation of natural and technogenic raw materials in the production of high-strength gypsum. *Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products: Materials of the IX International Scientific and*

- IX Международной научно-практической конференции.* Минск, 2018. С. 164–173.
9. Murat M. Structure, cristallochimie, et reactivite des sulfates de calcium. *Colloq. Int. de la RILEM: Sulfates de calcium et materiaux derives.* Lyon. 1977, pp. 59–172.
 10. Горбовский К.Г., Норов А.М., Кульпина Ю.Н. Исследование кинетики термической дегидратации фосфогипса // *Труды Кольского научного центра РАН.* 2019. № 1 (3). DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.79-86
 11. Lehmann H. Mathiak H, Kurpiers P. Untersuchungen uber Alterungsvorgange an frisch gebranntem Gips. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft.* 1973. No. 6.
 12. Ветегрове Х. Гомогенизатор CLAUDIUS PETERS – гипсовая технология для снижения затрат и повышения качества // *Строительные материалы.* 2010. № 7. С. 7–12.
 13. Ветегрове Х. Улучшение качества гипсового вяжущего на основе технологии SMARTGYP PROCESS компании CLAUDIUS PETERS // *Строительные материалы.* 2012. № 7. С. 37–41.
 14. Тишер Х.Б. Изменение свойств строительного гипса в условиях открытого хранения. *Повышение эффективности производства и применение гипсовых материалов: Материалы Всероссийского семинара.* М., 2002. С. 12–14.
 15. Wirsching F.X. Gips. Gebruder Knauf Westdeutsche Gipswerke. 1988. pp. 289–315.
 9. Murat M. Structure, cristallochimie, et reactivite des sulfates de calcium. *Colloq. Int. de la RILEM: Sulfates de calcium et materiaux derives.* Lyon. 1977.
 10. Gorbovskiy K.G., Norov A.M., Kulpina Yu.N. Investigation of the kinetics of thermal dehydration of phosphogypsum. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN.* 2019. No. 1 (3). DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.79-86 (In Russian).
 11. Lehmann H. Mathiak H, Kurpiers P. Untersuchungen uber Alterungsvorgange an frisch gebranntem Gips. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft.* 1973. No. 6.
 12. Vetegrove H. Homogenizer CLAUDIUS PETERS – gypsum technology to reduce costs and improve quality. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials].* 2010. No. 7, pp. 7–12. (In Russian).
 13. Vetegrove H. Improving the quality of gypsum binder based on the SMARTGYP PROCESS technology of the CLAUDIUS PETERS company. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials].* 2012. No. 7, pp. 37–41. (In Russian).
 14. Tischer H.B. Changing the properties of stucco in open storage conditions. *Increasing production efficiency and the use of gypsum materials: Materials of the All-Russian seminar.* Moscow. 2002, pp. 12–14. (In Russian).
 15. Wirsching F X. Gips. Gebruder Knauf Westdeutsche Gipswerke. 1988, pp. 289–315.



При поддержке Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, Союза строителей, ГП «Институт жилища НИПТИС им. Атаева С.С.», ГП «Институт НИИСМ», РУП «Институт БелНИИС» проектное предприятие «ТНКА-Архитек»

XI Международная научно-практическая конференция ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ЯЧЕЙСТОГО БЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

6–8 октября 2020 г.

г. Минск и г. Береза (Беларусь)

Тематика конференции

- ◆ особенности технического перевооружения и модернизации производственных линий
- ◆ использование инновационных технических и организационных решений, информационных технологий в области управления процессами производства
- ◆ оптимизация производств, совершенствование эксплуатационных свойств материала с применением химических добавок и микрофибр, исследования в области объемного армирования
- ◆ обеспечение высокого качества и оптимальных параметров изделий в процессе производства, транспортировки, применения и эксплуатации строительных объектов
- ◆ расширение номенклатуры изделий для полносборного строительства
- ◆ особенности и практика применения конструкционно-теплоизоляционных изделий из ячеистого бетона сниженной плотности с позиции долговечности конструкций
- ◆ опыт проектирования и возведения энергоэффективных жилых домов с комплексным применением ячеистого бетона
- ◆ изучение использования ячеистого бетона в нетрадиционных сферах
- ◆ отечественный и международный опыт, особенности производства, развития технологии и практики применения материала
- ◆ тенденции и перспективы развития отрасли ячеистого бетона автоклавного твердения, анализ рынков соседних стран, сертификация соответствия продукции по европейским стандартам

Формат конференции предусматривает пленарное заседание, работу по секциям и посещение производства ячеистого бетона и вибропрессованных плит, укомплектованного линиями полного цикла Masa-Henke, в ОАО «Березовский КСИ».

Срок подачи докладов, статей и рекламных модулей в сборник материалов конференции – 1 сентября 2020 г. Заполненную заявку отправлять в оргкомитет до 25 сентября 2020 г. по электронной почте info@architec.by Более подробная информация размещена на сайте организаторов www.architec.by

Техническое консультирование – «MASA GmbH» (Германия). Информационные партнеры: журнал «Строительные материалы» (Москва, Россия), «Строительные материалы» (Киев, Украина), журнал «Архитектура и строительство» (Минск, Беларусь), строительный портал «ЛайтБетон» (Россия), Национальная ассоциация производителей автоклавного газобетона, Всеукраинская ассоциация производителей автоклавного газобетона.

Р.И. ШИГАПОВ¹, главный технолог (ufagips@mail.ru);
Д.А. СИНИЦИН², канд. техн. наук (d4013438@yandex.ru),
Д.В. КУЗНЕЦОВ², канд. техн. наук (alex.03_2017@mail.ru),
А.М. ГАЙСИН², канд. техн. наук (askargaisin@yandex.ru),
И.В. НЕДОСЕКО², д-р техн. наук (nedoseko1964@mail.ru)

¹ ООО «Уфимская гипсовая компания» (450028, г. Уфа, ул. Производственная, 8)

² Уфимский государственный нефтяной технический университет (450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195)

Использование конструкционно-теплоизоляционного пеногипса при строительстве и реконструкции зданий. Проблемы и перспективы

В настоящее время при возведении строительных объектов различного назначения постепенно увеличиваются объемы применения современных теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов на минеральной основе (высокопустотные поризованные керамические изделия, ячеистые бетоны, сверхлегкий керамзитобетон и др.), основным достоинством которых, помимо высоких теплотехнических и звукоизоляционных характеристик, является также негорючесть и относительно невысокая стоимость. Одним из таких материалов является монолитный пеногипс, который может применяться для утепления чердачных и звукоизоляции междуэтажных перекрытий как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих зданий. В статье представлен опыт применения монолитного пеногипса плотностью 250–300 кг/м³ при капитальном ремонте и реставрации объекта историко-культурного наследия – здания Госпиталя ветеранов войн в г. Уфа, построенного в конце XIX в. Использование монолитного пеногипса позволило обеспечить требуемую теплоизоляцию чердачного перекрытия, звукоизоляцию и огнезащиту металлических конструкций междуэтажных перекрытий без увеличения нагрузки на несущие стены и фундаменты здания, а также выполнять работы при отрицательной температуре воздуха внутри помещения. Отмечено, что, несмотря на имеющийся положительный опыт, широкому внедрению пеногипса в практику строительства препятствует отсутствие данного материала в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и в сметных нормативах.

Ключевые слова: монолитный пеногипс, чердачное и междуэтажное перекрытия, негорючий утеплитель, звукоизоляция, уровень теплозащиты.

Для цитирования: Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кузнецов Д.В., Гайсин А.М., Недосеко И.В. Использование конструкционно-теплоизоляционного пеногипса при строительстве и реконструкции зданий. Проблемы и перспективы // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 28–33. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-28-33>

R.I. SHIGAPOV¹, Chief Technologist (ufagips@mail.ru); D.A. SINITSIN², Candidate of Sciences (Engineering) (d4013438@yandex.ru);

D.V. KUZNETSOV², Candidate of Sciences (Engineering) (alex.03_2017@mail.ru),

A.M. GAYSIN², Candidate of Sciences (Engineering) (askargaisin@yandex.ru), I.V. NEDOSECO², Doctor of Sciences (Engineering) (nedoseko1964@mail.ru)

¹ "Ufa Gypsum Company" LLC (8, Proizvodstvennaya Street, Ufa, 450028, Russian Federation)

² Ufa State Petroleum Technological University (195, Mendeleeva Street, Ufa, 450062, Russian Federation)

The Use of Structural and Thermal Insulation Foam Gypsum in the Construction and Reconstruction of Buildings. Problems and Prospects

In recent years, during the construction of construction projects for various purposes, the use of modern heat-insulating and structural-heat-insulating materials on a mineral basis (high-void porous ceramic products, aerated concrete, ultra-lightweight expanded clay concrete) has gradually increased, the main advantage of which, in addition to high thermal and sound insulation characteristics, is also incombustibility and relatively low cost. One of these materials is monolithic foam gypsum, which can be used for insulating attic and soundproofing interfloor floors both in new construction and in the reconstruction of existing buildings. The article presents the experience of using monolithic foam gypsum with a density of 250–300 kg/m³ in the overhaul and restoration of the object of historical and cultural heritage – the building of the Hospital of War Veterans in Ufa, built at the end of the 19th century, which made it possible to provide the required thermal insulation of the attic ceilings, sound insulation and fire protection of metal structures of the interfloor ceiling without increasing the load on the load-bearing walls and foundations of the building, as well as perform work at negative air temperatures inside the room. It is noted that, despite the existing positive experience, the widespread introduction of foam gypsum in construction practice is hindered by the absence of this material in Set of Rules 50.13330.2012 "Thermal protection of buildings" and in the estimated standards.

Keywords: monolithic foam gypsum, attic and interfloor floors, non-combustible insulation, sound insulation, thermal protection level.

For citation: Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Kuznetsov D.V., Gaisin A.M., Nedoseko I.V. The use of structural and thermal insulation foam gypsum in the construction and reconstruction of buildings. Problems and prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 28–33. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-28-33>

Современное строительство, как жилищно-гражданское, так и промышленное, требует от строительной индустрии существенного расширения объема производства теплоизоляционных, конструкционно-теплоизоляционных и звукоизоляционных материалов, которые наряду с обеспечением основных

показателей (требуемой теплоизолирующей и звукоизолирующей способности) обладали бы еще и целым комплексом дополнительных положительных свойств, прежде всего негорючестью, технологичностью в производстве и применении и, безусловно, экономичностью [1, 2].

Существенное ужесточение требований к характеристиками теплоизоляционных материалов началось в 1990-х гг. (начиная с введения Изменения № 3 к действующему еще советскому СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника», радикально, в несколько раз повысившего требования к термосопротивлению ограждающих конструкций) и продолжается и в настоящее время (Изменение № 1 к СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий») что, безусловно, является объективным процессом, связанным с общим повышением энергоэффективности строительства и сокращением топливно-энергетических затрат [3].

Если в 1990-х гг. строительные и жилищно-коммунальные организации планировали решить все проблемы энергосбережения за счет утеплителей на органической (пенополистирол, пенополиуретан) либо на минеральной основе с органическим связующим (минераловатные маты и плиты), то практика строительства и эксплуатации подобных зданий в последние десятилетия показала значительное количество отрицательных примеров (многочисленные пожары с серьезными последствиями, недостаточная долговечность и экологичность минераловатных и пенополистирольных утеплителей и др.) [4–6], что заставило строительную индустрию вернуться к применению традиционных теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов и изделий на минеральной основе, таких как ячеистые бетоны, керамзитобетоны, высокопустотные керамические изделия.

По сравнению с советским периодом отечественные производители названных материалов в последние годы достигли значительного прогресса. В частности, средняя плотность выпускаемых газобетонных изделий снизилась с 700–800 до 400–500 кг/м³ при достижении приемлемых прочностных показателей (класс прочности при сжатии В2,5 и более); зарубежные производители уже осваивают в промышленных масштабах выпуск теплоизоляционных плитных изделий пониженной плотности до 120–150 кг/м³ [7]. Производители керамзитового гравия в России и ближнем зарубежье за счет комплексной автоматизации технологического процесса не только снизили (по сравнению с 1970–1980 гг.) почти вдвое энергозатраты, но и обеспечили возможность промышленного производства особо легкого керамзита (с насыпной плотностью до 150–200 кг/м³) [8]. Кирпичные заводы во многих регионах освоили массовый выпуск пустотно-поризованных стеновых керамических изделий, которые по сравнению с полнотелым кирпичом той же прочности обеспечивают более высокие (в 3–4 раза) теплотехнические характеристики [9]. За рубежом (в Китае, Таиланде и ряде других стран Юго-Восточной Азии) в последние годы было освоено промышленное производство плитных пенокерамических изделий строительного назначения [10]. Данные изделия при стоимости, сопоставимой со стоимостью минераловатных плит повышенной жесткости, имеют практически ту же плотность (150–200 кг/м³) и соответственно теплопроводность, но при этом пенокера-

мика абсолютно негорюча и имеет по сравнению с минеральной ватой на порядок лучшие прочностные показатели, что позволило успешно применять изделия из пенокерамики для особо ответственных целей – облицовки фасадов высотных зданий.

Однако использование лишь сборных изделий (блоков или плит) на основе легких, ячеистых бетонов или пенокерамики, пусть даже с самыми лучшими показателями по теплоэффективности и коэффициенту конструктивного качества, во многих случаях по объективным причинам не может закрыть все потребности строительства в конструкционно-теплоизоляционных материалах. В частности, в условиях капитального ремонта, реконструкции и реставрации объектов архитектурного наследия возможны только монолитные способы производства работ и соответствующие им строительные материалы.

К сожалению, выбор представленных на строительном рынке конструкционно-теплоизоляционных материалов для монолитных технологий в реальности невелик и практически ограничивается лишь использованием керамзитовых засыпок и керамзитобетона различной плотности (крупнопористого и др.) в стяжках под полы и для разуклонки плоских малоуклонных кровель, причем его используют по большей части передовые, хорошо технологически оснащенные строительные организации Москвы и Московской области [11]. Использование монолитного пенобетона прорабатывалось многими исследователями в 1980–1990-е гг. но, несмотря вроде бы на очевидную перспективность этого материала (технология «Неопор» и др. [12]), практического распространения он не получил, прежде всего из-за сложностей при подборе состава и нестабильности качества получаемого материала. Использование материалов на органической основе (монтажные пены на основе пенополиуретана и др.) из-за противопожарных требований имеет весьма ограниченную сферу применения (для утепления соединений оконных и дверных конструкций со стенами) и, естественно, большинство специалистов не рекомендуют существенно расширять область использования данных материалов [13].

Важным резервом в области расширения производства и применения конструкционно-теплоизоляционных материалов на минеральной основе может стать пеногипс, который, по мнению авторов, является наиболее востребованным и перспективным материалом для монолитного способа производства строительно-монтажных работ.

ООО «Уфимская гипсовая компания» имеет пятнадцатилетний положительный опыт строительства и эксплуатации одноэтажных жилых домов социального назначения, выполненных по каркасно-монолитной технологии с несущими стенами из деревянного каркаса с заполнением монолитным пеногипсом [14]. Комплексные исследования теплоизоляционных и звукоизоляционных свойств пеногипса, полученного по монолитной технологии с использованием серийно выпускаемого отечественного оборудования (ка-



Рис. 1. Здание Госпиталя ветеранов войн по ул. Тукаева в г. Уфа (часть здания, подлежащая капитальному ремонту)

Fig. 1. The building of the Hospital for war veterans on the Tukayeva street in Ufa (part of the building subject to major repairs)

витационно-вихревой установки), выполненные в 2013 г. НИИСФ РААСН (см. таблицу), подтвердили его достаточно высокие строительно-технологические характеристики. Проведенные НИИСФ РААСН исследования позволили авторам данной статьи рекомендовать пеногипс для более широкого использования в жилищно-гражданском строительстве, в частности для таких ответственных строительных работ, как реконструкция объектов историко-культурного наследия.

В проекте капитального ремонта и реставрации здания Госпиталя ветеранов войн (рис. 1) (объект историко-культурного наследия – бывшее здание Уфимского Епархиального училища, построенное в конце XIX в.), который прошел две государственные экспертизы (первая – на соответствие стоимости выполняемых работ; вторая – на соответствие используемых материалов и технологий при реставрации объекта историко-культурного наследия); монолитный пеногипс использовался для утепления взамен пришедшей в негодность шлаковой засыпки существующего чердачного перекрытия (рис. 2), а также в



Рис. 2. Конструкция чердачного перекрытия реставрируемого здания Уфимского госпиталя с использованием монолитного пеногипса в качестве негорючего утеплителя

Fig. 2. The construction of the attic floor of the restored building of the Ufa hospital using monolithic foam gypsum as a non-combustible insulation

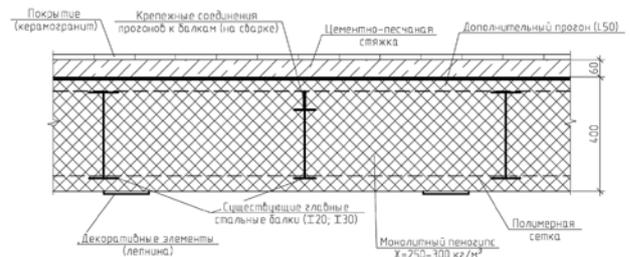


Рис. 3. Междуэтажное перекрытие реставрируемого здания Уфимского госпиталя с использованием монолитного пеногипса в качестве звукоизоляционного и огнезащитного материала

Fig. 3. Interfloor overlap of the restored building of the Ufa hospital using monolithic foam gypsum as a soundproof and fireproof material

качестве звукоизоляционного и огнезащитного материала междуэтажного перекрытия.

Как показала практика, эффективность использования монолитного пеногипса в чердачном и междуэтажном перекрытиях (рис. 3) состоит в следующем:

- во-первых, пеногипс (плотностью 250–300 кг/м³) значительно легче шлаковой засыпки (плотность 900–1100 кг/м³), и его использование в перекрытиях позволило существенно облегчить вес перекрытия и уменьшить нагрузку на основные несущие конструкции здания (стены и фундаменты), которые почти за 150 лет эксплуатации и так получили значительный физический износ;

- во-вторых, монолитный пеногипс обеспечивает как достаточную звукоизоляцию междуэтажных пе-

Результаты определения физико-механических и теплотехнических показателей образцов пеногипса, выпускаемого ООО «Уфимская гипсовая компания» (по данным отчета НИИСФ РААСН по договору № 61150 (2013))
The results of determining the physical, mechanical and thermal characteristics of the foam gypsum samples produced by the “Ufa Gypsum Company” LLC (according to the report of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences under contract No. 61150 (2013))

Показатель	Единица измерения	Среднее значение показателя
Плотность	кг/м ³	400
Теплопроводность в сухом состоянии при t=25°C	Вт/(м·°C)	0,12
Расчетные характеристики теплопроводности: – при условиях эксплуатации конструкций «А», – при условиях эксплуатации конструкции «Б»	Вт/(м·°C) Вт/(м·°C)	0,17 0,26
Паропроницаемость	мг/(м·ч·Па)	0,264
Предел прочности при сжатии	МПа	0,8
Коэффициент размягчения	–	0,31

Примечание. Представлены результаты испытаний образцов пеногипса плотностью 400 кг/м³. В настоящее время ООО «Уфимская гипсовая компания» освоила выпуск монолитного пеногипса плотностью 200–300 кг/м³ с более высокими теплотехническими характеристиками.



Рис. 4. Установка для приготовления пеногипса (размещалась в зимний период на улице рядом с объектом)
Fig. 4. The machine for making foam gypsum (placed in the street next to the object in winter)



Рис. 6. Процесс заливки пеногипса в конструкцию перекрытия первого этажа
Fig. 6. The process of pouring foam gypsum into the structure of the first floor



Рис. 5. Начальный этап заливки пеногипса в конструкцию перекрытия первого этажа (работы выполнялись в зимний период)
Fig. 5. The initial stage of pouring foam gypsum into the structure of the first floor overlap (work was carried out in winter)



Рис. 7. Завершение технологического процесса заливки монолитного пеногипса в конструкцию перекрытия первого этажа (перед устройством цементно-песчаной стяжки)
Fig. 7. Completion of the technological process of pouring monolithic foam gypsum into the floor structure of the 1st floor (before the installation of the cement-sand screed)

рекрытий, так и огнезащиту существующих стальных балок без какой-либо их дополнительной обработки весьма дорогостоящими огнезащитными вспучивающимися окрасочными или штукатурными составами;

- в-третьих, и это, по мнению авторов, особенно важно при производстве ремонтно-реставрационных работ, заливка монолитным пеногипсом (рис. 4–7) позволяет обеспечить практически любые требования по геометрическим характеристикам. В частности, при капитальном ремонте здания Госпиталя ве-

теранов войн после демонтажа прогнившего дощатого настила, деревянных балок и шлаковой засыпки выяснилось, что стальные главные балки междуэтажного перекрытия имеют разновысотные отметки и соответственно толщина слоя пеногипса изменялась от 25 до 40 см. Ровная поверхность позволила в дальнейшем восстановить высококачественную отделку потолочного покрытия в виде гипсовой лепнины;

- в-четвертых, на данном объекте в связи с производственной необходимостью все внутренние ре-

монтажные работы проводились в осенне-зимний период при неработающей системе отопления, при этом быстрые сроки схватывания (20–30 мин уже с учетом введения замедлителя) позволили осуществлять заливку пеногипса при отрицательной температуре (необходим был только подогрев воды за твердения).

Использование монолитного пеногипса позволило удешевить работы по капитальному ремонту объекта (по сравнению с полужесткими минераловатными плитами стоимость пеногипса в несколько раз ниже) и ускорить выполнение работ. В настоящее время капитальный ремонт Госпиталя ветеранов войн завершен и данный объект успешно функционирует.

Проведение работ на данном объекте показало, что основные проблемы связаны, к сожалению, не со строительством (все производственные задачи практически решаемы, имеется отечественное оборудование по приготовлению пеногипса), а с проектирова-

нием (проектировщики зачастую вообще ничего не знают ни о пеногипсе, ни о его применении) и, главное, с согласованием экспертизой проектной документации. В действующем СП 50.13330.2012 (с Изменением № 1) «Тепловая защита зданий» отсутствует термин «пеногипс», хотя представлены многие другие утеплители, которые в настоящее время практически не используются (камышитовые плиты и т. д.), поэтому приходится использовать общую терминологию для подобных теплоизоляционных материалов – «ячеистые бетоны», что, по мнению большинства экспертов, не вполне корректно. Также работы, связанные с пеногипсом, отсутствуют и в сметных нормативах. Авторы выражают надежду, что названные трудности организационного порядка будут в ближайшем будущем решены и монолитный пеногипс займет свое достойное место среди производимых отечественной стройиндустрией теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов.

Список литературы

1. Гагарин В.Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем // *АВОК*. 2007. № 6. С. 82–90.
2. Гагарин В.Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем // *АВОК*. 2007. № 7. С. 66–74.
3. Бабков В.В., Синицин Д.А., Кузнецов Д.В., Гайсин А.М., Синицина Е.А. Двадцатилетний опыт применения фасадной теплоизоляции с тонким штукатурным слоем в Республике Башкортостан // *Строительные материалы*. 2019. № 12. С. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-78-83>
4. Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Тутьгин А.С., Фролова М.А. Неорганическое связующее для минераловатной теплоизоляции // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 86–88.
5. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю. и др. Технологические аспекты эксплуатационной стойкости минеральных волокон // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 1. С. 32–36.
6. Перфилов В.А., Пилипенко А.С., Пятаев Е.Р. Эксплуатационная стойкость минераловолокнистых изделий // *Вестник МГСУ*. 2016. № 3. С. 79–85.
7. Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Чжоу Ч. Характеристики теплопроводности газобетона российского и китайского производства. В кн.: *Методология безопасности среды жизнедеятельности. Программа и тезисы IV Крымской Международной научно-практической конференции*. 2017. С. 24–25.
8. Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Бикташева А.Р., Недосеко И.В. Использование облегченного керамзита для утепления чердачных перекрытий // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 104–108. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-104-108>
9. Габитов А.И., Удалова Е.А., Салов А.С., Черно-ва А.Р., Пыжьянова Д.В., Ямилова В.В. Истори-

References

1. Gagarin V.G. Thermal insulation facades with a thin plaster layer. *AVOK*. No. 6. pp. 82–90. (In Russian).
2. Gagarin V.G. Thermal insulation facades with a thin plaster layer. *AVOK*. No. 7, pp. 66–74. (In Russian).
3. Babkov V.V., Sinitsin D.A., Kuznetsov D.V., Gaysin A.M., Sinitsina E.A. Twenty years of experience in the use of facade insulation with a thin plaster layer in the Republic of Bashkortostan. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 12, pp. 78–83. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-78-83>
4. Drozdnyuk T.A., Aizenshtadt A.M., Tutygin A.S., Frolova M.A. Inorganic binder for mineral wool insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 5, pp. 86–88. (In Russian).
5. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu. et al. Technological aspects of the operational resistance of mineral fibers. *Promishlennoe I grsgdanskoe stroitel'stvo*. 2015. No. 1, pp. 32–36. (In Russian).
6. Perfilov V.A., Pilipenko A.S., Pyataev E.R. Operational resistance of mineral fiber products. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 3, pp. 79–85. (In Russian).
7. Gagarin V.G., Pastushkov P.P., Zhou Ch. Characteristics of thermal conductivity of aerated concrete of Russian and Chinese production. In the book: *Methodology for the safety of the living environment. Program and theses of the IV Crimean International Scientific and Practical Conference*. 2017, pp. 24–25. (In Russian).
8. Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Biktasheva A.R., Nedoseko I.V. The use of lightweight expanded clay for insulation of attic floors. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 104–108. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-104-108>
9. Gabitov A.I., Udalova E.A., Salov A.S., Chernova A.R., Pyzh'yanova D.V., Yamilova V.V. Historical aspects of the production and use of high-hollow ceramic

- ческие аспекты производства и применения высокопустотных керамических изделий // *История науки и техники*. 2017. № 6. С. 58–65.
10. Шаяхметов У.Ш., Хамидуллин А.Р., Захаров А.В., Чудинов В.В. Технология и производство пенокерамики строительного назначения. В сб.: *Актуальные вопросы современного материаловедения. Материалы VI Международной молодежной научно-практической конференции*. 2020. С. 347–351.
 11. Недосеко И.В., Бабков В.В., Алиев Р.Р. и др. Применение конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона при строительстве и реконструкции зданий жилищно-гражданского назначения // *Известия КГАСУ*. 2010. № 1. С. 325–330.
 12. Бедов А.И., Бабков В.В., Габитов А.И., Гайсин А.М. и др. Конструктивные решения и особенности расчета теплозащиты наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков // *Вестник МГСУ*. 2012. № 2. С. 98–103.
 13. Бессонов И.В., Шигапов Р.И., Бабков В.В. Теплоизоляционный пеногипс в малоэтажном строительстве // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 9–13.
 14. Булатов Б.Г., Шигапов Р.И., Ивлев М.А., Недосеко И.В. Каркасно-монолитная технология строительства малоэтажных зданий из пеногипса и стальных тонкостенных конструкций // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 36–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-36-3>
- products // *History of Science and Technology*. 2017. No. 6, pp. 58–65. (In Russian).
10. Shayakhmetov U.Sh., Khamidullin A.R., Zakharov A.V., Chudinov V.V. Technology and production of foam ceramics for construction purposes. *In the collection: Topical issues of modern materials science. Materials of the VI International Youth Scientific and Practical Conference*. 2020, pp. 347–351. (In Russian).
 11. Nedoseko I.V., Babkov V.V., Aliev R.R. and others. Application of constructional and heat-insulating expanded clay concrete during construction and reconstruction of buildings for housing and civil purposes. *Izvestiya KGASU*. 2010. No. 1, pp. 325–330. (In Russian).
 12. Bedov A.I., Babkov V.V., Gabitov A.I., Gaisin A.M. and others. Constructive solutions and features of the calculation of thermal protection of external walls of buildings on the basis of autoclaved aerated concrete blocks. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 2, pp. 98–103. (In Russian).
 13. Bessonov I.V., Shigapov R.I., Babkov V.V. Thermal insulation foam gypsum in low-rise construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 7, pp. 9–13. (In Russian).
 14. Bulatov B.G., Shigapov R.I., Ivlev M.A., Nedoseko I.V. Frame-monolithic technology of construction of low-rise buildings made of foam gypsum and steel thin-walled structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 36–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-36-39> (In Russian).

BARKRAFT®

УФИМСКАЯ
ГИПСОВАЯ
КОМПАНИЯ

Реклама

ПРОДАЖА ГИПСА

Г5 БII строительный
Г5 БIII формовочный

ПРОДАЖА \ ТОЛЛИНГ ССС

Штукатурки • Шпаклевки
Клеи • Наливные полы



Уфа, ул. Цветочная, 3/3
тел. +7 (347) 226-08-08
www.barkraft.ru


ТАРА


БИГ-БЭГ


НАВАЛ


ЖД


АВТО


РФ/СНГ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ®

научно-технический и производственный журнал
июль 2020

33

М.С. ГАРКАВИ¹, д-р техн. наук (mgarkavi@mail.ru), А.В. АРТАМОНОВ¹, канд. техн. наук (aav@uralomega.ru); Е.В. КОЛОДЕЖНАЯ², канд. техн. наук (kev@uralomega.ru); А.П. НЕФЕДЬЕВ³, инженер (info@sinergo.ru), Е.А. ХУДОВЕКОВА³, инженер (info@sinergo.ru)

¹ ЗАО «Урал-Омега» (455037, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 89, стр. 7)

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (111020, г. Москва, Крюковский тупик, 4)

³ ООО «Синерго» (455000, г. Магнитогорск, ул. Чапаева, 15)

Гипсовое вяжущее низкой водопотребности: производство и свойства

Снижение водопотребности гипсовых вяжущих остается актуальной научной и практической задачей. Высокая водопотребность строительного гипса обусловлена пористым строением его кристаллического блока. Снижение водопотребности при производстве гипсовых материалов и изделий достигается применением высокопрочного гипсового вяжущего, технологической операции искусственного старения или использованием водоредуцирующих добавок. Одним из решений проблемы снижения водопотребности строительного гипса является производство гипсового вяжущего низкой водопотребности. Разработана технология изготовления гипсового вяжущего низкой водопотребности в центробежно-ударной мельнице с использованием жидкого модификатора на основе поликарбоксилатного эфира. В этом аппарате совмещены процессы измельчения, механоактивации и химического модифицирования. В результате механохимической обработки на поверхности частиц вяжущего формируется наноструктура химического модификатора. Полученное вяжущее имеет водопотребность 29%, прочность при сжатии 10 МПа, прочность при изгибе 3,5 МПа (через 2 ч твердения). Высокая прочность гипсового камня достигается изменением морфологии частиц двухводного гипса и формированием большого числа межчастичных контактов. По своим строительно-техническим свойствам гипсовое вяжущее низкой водопотребности соответствует высокопрочным гипсовым вяжущим.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, водопотребность, центробежно-ударная мельница, механоактивация, модификатор.

Для цитирования: Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Неведьев А.П., Худовекова Е.А. Гипсовое вяжущее низкой водопотребности: производство и свойства // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 34–38.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38>

M.S. GARKAVI¹, Doctor of Sciences (Engineering) (mgarkavi@mail.ru), A.V. ARTAMONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (aav@uralomega.ru); E.V. KOLODEZHNYAYA², Candidate of Sciences (Engineering) (kev@uralomega.ru); A.P. NEFEDJEV³, Engineer (info@sinergo.ru), E.A. KHUDOVEKOVA³, Engineer (info@sinergo.ru)

¹ Ural-Omega, PJSC (89, Building 7, Lenina Avenue, Magnitogorsk, 455037, Russian Federation)

² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (4, Kryukovskiy dead end, Moscow, 111020, Russian Federation)

³ Synergo, LLC (15, Chapayeva street, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation)

Plaster Binders of Low Water Demand: Production and Properties

Reducing the water demand of gypsum binders remains an actual scientific and practical task. The high water demand of building gypsum is due to the porous structure of its crystal block. Reduction of water demand in the production of gypsum materials and products is achieved by the use of high-strength gypsum binder, technological operation of artificial aging or the use of water-reducing additives. One of the solutions to the problem of reducing the water demand of construction gypsum is the production of gypsum binder of low water demand. A technology for manufacturing a gypsum binder of low water demand in a centrifugal impact mill using a liquid modifier based on polycarboxylate ether has been developed. This machine combines the processes of grinding, mechanical activation and chemical modification. As a result of mechanochemical treatment, the nanostructure of the chemical modifier is formed on the surface of the binder particles. The binder obtained has a water demand of 29%, compressive strength of 10 MPa, bending strength of 3.5 MPa (after 2 hours of hardening). High strength of gypsum stone is achieved by changing the morphology of particles of gypsum dehydrate and forming a large number of interparticle contacts. Construction and technical properties of the gypsum binder of low water demand corresponds to high-strength gypsum binders.

Keywords: gypsum binder, water demand, centrifugal impact mill, mechanical activation, modifier.

For citation: Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefediev A.P., Hudovekova E.A. Gypsum binder of low water demand: production and properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 34–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38>

Применение гипсовых материалов в строительстве не соответствует их потенциальным возможностям, что обусловлено высокой водопотребностью гипсовых вяжущих. Водопотребность вяжущего в значительной степени влияет на прочность гипсового камня, его долговечность, а также на расход энергии при сушке гипсовых изделий.

Несмотря на многолетние и многочисленные исследования, задача снижения водопотребности гипсовых вяжущих не утратила своей актуальности. При этом до настоящего времени не предложено кардинальных методов решения данной проблемы [1, 2].

Высокая водопотребность строительного гипса (β -модификация) обусловлена пористостью его

кристаллического блока, что связано с технологией производства этого вяжущего. Снижение водопотребности достигается, в частности, применением в технологии гипсовых изделий высокопрочного гипсового вяжущего (α -модификация). Пониженная его водопотребность обусловлена высокоплотной структурой кристаллического блока [3], однако производство высокопрочных вяжущих связано с большими энергозатратами.

Так как основным видом вяжущего при производстве гипсовых материалов и изделий является полугидрат сульфата кальция β -модификации, основные усилия сосредоточены на снижении его водопотребности. Одним из технологических приемов, направленных на уменьшение водопотребности, является применение искусственного старения. Сущность искусственного старения заключается в частичной гидратации исходного полугидрата, превращении растворимого ангидрита в полугидрат, укрупнении частиц и залечивании микродефектов структуры исходного полугидрата за счет образования двуводного гипса и кристаллизации его в микропорах исходного вяжущего [4, 5]. Структура гипсового вяжущего в результате искусственного старения претерпевает существенные изменения и характеризуется изменением его удельной поверхности, что влечет за собой снижение водопотребности гипсового вяжущего, однако уменьшение этого параметра не превышает 10–14%.

Широко распространенным и наиболее применяемым способом снижения водотвердого отношения является введение в гипсовую композицию поверхностно-активных водорастворимых веществ (ПАВ), причем водопонижающий эффект зависит от их химической природы. Несмотря на технологическую простоту этого метода снижения водопотребности, достигаемый эффект даже при использовании современных водоредуцирующих добавок не превышает 40% [6, 7].

Реальным способом снижения водопотребности строительного гипса β -модификации является изготовление вяжущих низкой водопотребности (по аналогии с цементами низкой водопотребности), которые относятся к перспективным и эффективным видам минеральных вяжущих [8–10]. Традиционным методом изготовления вяжущих низкой водопотребности (ВНВ) является измельчение исходного вяжущего совместно с сухим пластификатором в шаровой

мельнице или домол уже готового вяжущего с пластификатором [11, 12]. При получении ВНВ в шаровых мельницах происходит втирание модификатора в поверхность частиц вяжущего вещества [8]. Особенность этой технологии заключается в том, что сухие пластификаторы необходимо равномерно распределить и закрепить на поверхности вяжущего, следовательно при этом способе изготовления ВНВ очень сложно обеспечить стабильность строительно-технических показателей цемента. Недостатком данного способа изготовления ВНВ является также высокий (до 3–5 мас. %) расход суперпластификатора [12]. Для решения указанной проблемы и широкого производства ВНВ необходимо использовать жидкие пластификаторы.

Изготовление ВНВ с использованием жидких пластификаторов целесообразно производить в центробежно-ударных мельницах, которые применяются для получения различных тонкодисперсных материалов [13]. При этом данный аппарат рассматривается как своеобразный реактор, в котором происходит преобразование упругой энергии удара в структурные дефекты, на которых осуществляется «прививка» жидкого модификатора [13].

Отличительной особенностью центробежно-ударных мельниц является их высокая энергонапряженность (более 10 кВт/кг), вследствие чего «доза» механической энергии, передаваемой материалу, достигает 102 кДж/г. Это позволяет совмещать в них процессы измельчения и механохимической активации. Результатом является возрастание реакционной способности твердых веществ вследствие создания в них структурных микродефектов и активных поверхностных центров, которые обладают избыточной свободной энергией и, высокой адсорбционной способностью.

В камере помола центробежно-ударной мельницы в потоке воздуха со скоростью порядка 100 м/с раствор пластификатора превращается в аэрозоль. В результате происходит равномерное распределение модификатора на поверхности каждой частицы, а за счет высокой степени сопряжения компонентов достигается закрепление добавки на активных поверхностных центрах, которое реализуется по механизму молекулярного наслаивания. Этот метод обеспечивает формирование на частицах вяжущего вещества поверхностных наноструктур пластификатора с точностью до одного мономолекулярного слоя [14].

Строительно-технические свойства гипсовых вяжущих Construction and technical properties of gypsum binders

Гипсовое вяжущее	Расплав по Суттарду, мм	В/Г	Сроки схватывания, мин		Прочность через 2 ч, МПа	
			начало	конец	при сжатии	при изгибе
Гипс Borkraft Г5	180	0,64	5	10	3,9	2,6
Гипсовое вяжущее низкой водопотребности	180	0,29	7	12	10	3,5

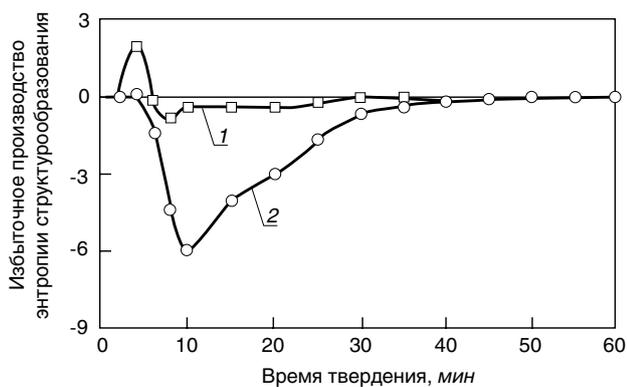


Рис. 1. Термодинамическая устойчивость структуры гипсового камня: 1 – на основе Barkraft Г5; 2 – на основе ГВНВ
Fig. 1. Thermodynamic stability of the structure of gypsum stone: 1 – based on Barkraft gyps G5; 2 – based on gypsum binder low water demand

Материалы и методы исследования

Для получения гипсового вяжущего низкой водопотребности (ГВНВ) использовался кусковой полугидрат сульфата кальция (β -модификация), полученный обжигом природного гипсового камня во вращающейся печи. Строительный товарный гипс (Barkraft, г. Уфа), изготовленный из данного сырья, соответствует марке Г5 (ГОСТ 125–2018).

Гипсовое вяжущее низкой водопотребности изготовлено измельчением кускового полугидрата сульфата кальция в центробежно-ударной мельнице при скорости вращения ротора 30 м/с. В камеру помола подавался комплексный модификатор, состоящий из 40%-ного водного раствора поликарбоксилатного эфира и мелассы, при этом общий расход модификатора составил 1,5% от массы гипсового вяжущего. Тонкость помола полученного гипсового вяжущего низкой водопотребности характеризуется остатком на сите № 02, равном 10,4%. Для изучения твердения исследуемых вяжущих систем использован термодинамический метод в соответствии с [15]. Электронно-микроскопический анализ микроструктуры гипсового камня проведен в Веймарском строительном университете (Германия).

Результаты и обсуждение

Строительно-технические параметры гипсового вяжущего низкой водопотребности приведены в таблице.

Как следует из приведенных в таблице данных, водопотребность полученного гипсового вяжущего низкой водопотребности в 2,2 раза ниже исходного вяжущего, а по своим прочностным свойствам приближается к высокопрочным гипсовым вяжущим (α -модификация).

Высокие физико-механические характеристики гипсового камня на основе ГВНВ обусловлены не только низким водосодержанием, но и характером формирования его структуры.

При твердении исследуемых гипсовых вяжущих превращение первичной коагуляционной структуры,

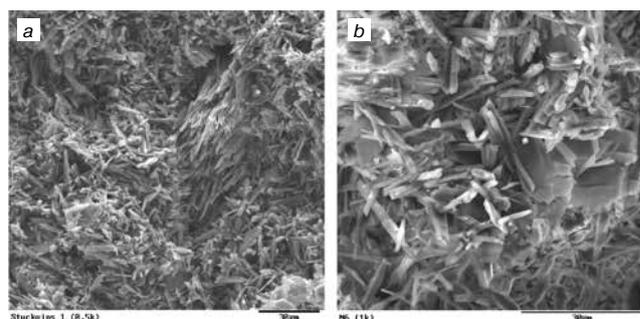


Рис. 2. Микроструктура гипсового камня: а – на основе Barkraft Г5; б – на основе ГВНВ
Fig. 2. The microstructure of gypsum stone: a – based on Barkraft gyps G5; b – based on gypsum binder low water demand

где контактирование частиц осуществляется через прослойки жидкой фазы, в псевдоконденсационную структуру с точечными контактами происходит через формирование термодинамически неустойчивой коагуляционной структуры. Наиболее заметные изменения в термодинамической устойчивости структурных состояний наблюдаются в системе гипсового вяжущего низкой водопотребности: промежуточное структурное состояние обладает максимальной неустойчивостью, что характеризуется отрицательным значением величины избыточного производства энтропии (рис. 1) [15].

Образование структуры гипсового камня связано с фиксацией частиц твердой фазы на расстояниях ближней и дальней коагуляции. При этом контакты ближней коагуляции (точечные контакты) образуются за счет вырождения контактов дальней коагуляции, что возможно только при преодолении энергетического барьера. Для преодоления этого энергетического барьера частицы гипсовой дисперсии должны обладать избытком энергии, что и приводит к нарушению устойчивости структурного состояния. Таким образом, термодинамическая неустойчивость структуры соответствует состоянию, при котором в гипсовой дисперсии действуют силы как дальней, так и ближней коагуляции. Следует отметить, что в системе на основе ГВНВ структурные превращения происходят при меньших энергетических затратах, это обусловлено снижением водопотребности вяжущего и, следовательно, меньшей толщиной жидких прослоек.

Прочность искусственного камня определяется как прочностью индивидуального контакта между частицами, так и числом контактов на единицу поверхности разрушения. Прочность контакта зависит от интенсивности взаимодействия между частицами, а число контактов от размера частиц [16]. Действие пластификаторов на основе поликарбоксилатов основано на совокупности электростатического и стерического эффектов. Это достигается с помощью боковых гидрофобных полиэфирных цепей молекулы поликарбоксилатного эфира. При их использовании в гипсовой дисперсии создаются наиболее благоприятные условия для интенсивного взаимодействия между частицами и увеличения прочности индивиду-

альных контактов. Упрочнению и увеличению числа контактов может также способствовать повышение степени кристаллохимического подобия образующихся кристаллов двуводрата (рис. 2). Следует отметить, что в камне на основе ГВНВ происходит и изменение морфологии образующегося двуводрата.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена эффективность применения центробежно-

ударных мельниц для производства гипсовых вяжущих низкой водопотребности. При изготовлении этих вяжущих в данных аппаратах возможно совмещение процессов искусственного старения и химического модифицирования поверхности гипсового вяжущего для снижения его водопотребности. По своим строительно-техническим свойствам полученные ГВНВ соответствуют высокопрочным гипсовым вяжущим и могут заменить их в различных областях применения.

Список литературы

1. Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве // *Российский химический журнал*. 2003. Т. XLVII. № 4. С.18–25.
2. Лесовик, В.С., Погорелов С.А., Строкова В.В. Гипсовые вяжущие материалы и изделия. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. 224 с.
3. Бобров Б.С., Ромашков А.В. Различия в гидратации β - и α -форм полугидрата сульфата кальция // *Неорганические материалы*. 1991. Т. 22. № 10. С. 2181–2183.
4. Nekrasova S.A., Garkavi M.S. Research of process of gypsum binding “ageing”. *16 Internationale Baustofftagung*. Weimar. 2006. Part. 1, pp. 913–916.
5. Garkavi M., Fischer H.-B., Buryanov A. Aspects of gypsum dihydrate crystallization in the artificial aging of gypsum binder // *ZKG International*. 2017. No. 11, pp. 52–56.
6. Хозин В.Г., Майсурадзе Н.В., Мустафина А.Р., Корнянен М.Е. Влияние химической природы пластификаторов на свойства гипсового теста и камня // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-35-39>
7. Долгорев В.А., Долгорев А.В., Тарасов В.Н., Лебедев В.С. Новые отечественные поликарбонаты для монолитных бетонов на основе гипсового вяжущего // *Технологии бетонов*. 2015. № 9–10. С. 13–15.
8. Юдович Б.Э., Дмитриев А.М., Зубехин С.А., Башлыков Н.Ф., Фаликман В.Р., Сердюк В.Н., Бабаев Ш.Т. Цементы низкой водопотребности – вяжущие нового поколения // *Цемент и его применение*. 1997. № 1. С. 15–18.
9. Серова Р.Ф., Ткач Е.В., Стасилович Е.А., Садчикова Ю.С. Разработка состава и способа производства эффективных материалов на гидрофобном вяжущем низкой водопотребности // *Труды Карагандинского государственного технического университета*. 2018. № 2. С. 78–82.
10. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р., Гиззатуллин А.Р., Харченко И.Я. Карбонатные цементы низкой водопотребности – зеленая альтернатива цементной индустрии России // *Строительные материалы*. 2014. № 5. С. 76–82.

References

1. Korovyakov V.F. Gypsum binders and their use in construction. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2003. Vol. XLVII. No. 4, pp. 18–25. (In Russian).
2. Lesovik V.S., Pogorelov S.A., Strokova V.V. Gipsovye vyazhushchie materialy i izdeliya [Gypsum binders and products]. Belgorod: BelGTASM Publishing House. 2000. 224 p.
3. Bobrov B.S., Romashkov A.V. The difference in the hydration of β - and α -forms of calcium sulfate hemihydrate. *Neorganicheskie materialy*. 1991. Vol. 22. No. 10, pp. 2181–2183. (In Russian).
4. Nekrasova S.A., Garkavi M.S. Research of process of gypsum binding “aging”. *16 Internationale Baustofftagung*. Weimar. 2006. Part 1, pp. 913–916.
5. Garkavi M., Fischer H.-B., Buryanov A. Aspects of gypsum dihydrate crystallization in the artificial aging of gypsum binder. *ZKG International*. 2017. No. 11, pp. 52–56.
6. Khozin V.G., Maysuradze N.V., Mustafina A.R., Kornyanen M.E. Influence of the chemical nature of plasticizers on the properties of gypsum paste and stone. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 10, pp. 35–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-35-39>
7. Dolgorev V.A., Dolgorev A.V., Tarasov V.N., Lebedev V.S. New domestic polycarboxylates for monolithic concrete based on gypsum binder. *Tehnologii betonov*. 2015. No. 9–10, pp. 13–15. (In Russian).
8. Yudovich B.E., Dmitriev A.M., Zubekhin S.A., Bashlykov N.F., Falykman V.R., Serdyuk V.N., Babaev Sh.T. Cements of low water demand – binders of a new generation. *Tsement i ego primeneniye*. 1997. No. 1, pp. 15–18. (In Russian).
9. Serova R.F., Tkach E.V., Stasilovich E.A., Sadchikova Yu.S. Development of the composition and method for the production of effective materials on a hydrophobic binder of low water demand. *Transactions of Karaganda State Technical University*. 2018. No. 2, pp. 78–82. (In Russian).
10. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Sibgatullin I.R., Gizzatullin A.R., Kharchenko I.Ya. Carbonate cements of low water demand – a green alternative to the cement industry in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 5, pp. 76–82. (In Russian).
11. Babaev Sh.T., Bashlykov N.F., Serdyuk V.N. Osnovnye printsipy polucheniya vysokoeffektivnykh

11. Бабаев Ш.Т., Башлыков Н.Ф., Сердюк В.Н. Основные принципы получения высокоэффективных вяжущих низкой водопотребности. М.: ВНИИЭСМ, 1991. 77 с.
12. Сивков С.П., Имед Жедда. Высокоэффективные органоминеральные пластификаторы для производства вяжущих низкой водопотребности. *I Международное (IX Всесоюзное) совещание по химии и технологии цемента*. М., 1996. С. 155–156.
13. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худовекова Е.А., Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-14-17>
14. Малыгин А.А. Нанотехнология молекулярного наслаивания // *Российские нанотехнологии*. 2007. Т. 2. № 3–4. С. 87–100.
15. Гаркави М. Термодинамика твердения вяжущих систем. Теоретические принципы и технологические приложения. Berlin: Palmarium Academic Publishing, 2013. 247 с.
16. Гаркави М.С., Некрасова С.А., Трошкина Е.А. Кинетика формирования контактов в наномодифицированных гипсовых материалах // *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 38–40.
- vyazhushchikh nizkoi vodopotrebnosti [The basic principles of obtaining highly effective binders of low water demand]. Moscow: VNIIESM. 1991. 77 p.
12. Sivkov S.P., Imed Jemma. Highly effective organo-mineral plasticizers for the production of binders for low water demand. *I International (IX All-Union) Meeting on the chemistry and technology of cement*. Moscow. 1996, pp. 155–156. (In Russian).
13. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefedev A.P., Khudovekova E.A., Buryanov A.F., Fisher H.-B. Activated fillers for gypsum and anhydrite mixes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-14-17> (In Russian).
14. Malygin A.A. Nanotechnology of molecular layering. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2007. Vol. 2. No. 3–4, pp. 87–100. (In Russian).
15. Garkavi M. Termodinamika tverdeniya vyazhushchikh sistem. Teoreticheskie printsipy i tekhnologicheskie prilozheniya [Thermodynamics of hardening of knitting systems. Theoretical principles and technological applications]. Berlin: Palmarium Academic Publishing. 2013. 247 p.
16. Garkavi M.S., Nekrasova S.A., Troshkina E.A. Kinetics of contact formation in nano-modified gypsum materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 2, pp. 38–40. (In Russian).

23-25 сентября

📍 ВАНХЭКСПО Уфа 2020

БВК
БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ

ФОРУМ УРАЛСТРОЙИНДУСТРИЯ



Специализированные выставки

Строительство
Ярмарка недвижимости

Свяжитесь
с нами

www.stroybvk.ru
stroy@bvkexpo.ru

+7 (347) 246-41-80
+7 (347) 241-74-19

📷 [stroybvk](#)

f [stroyexpo.ufa](#)

#бvk

#стройбvk

Ю.В. ПУХАРЕНКО, д-р техн. наук, член-кор. РААСН (tsik@spbgasu.ru),
И.У. АУБАКИРОВА, канд. техн. наук, В.И. ХИРХАСОВА, инженер (аспирант)

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

Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии

В последние годы особое значение и исключительный интерес для строительного материаловедения и технологий приобретают материалы фуллероидной структуры с максимальным размером частиц от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, представляющие собой особую форму углерода и обеспечивающие получение промышленно значимых эффектов при содержании их в составе сырьевых смесей в микродозах. Вместе с тем существуют наноматериалы, способные составить указанным веществам определенную альтернативу. В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния нанофибриллярной целлюлозы на структуру и свойства цементного композита. Проведен рентгеноспектрометрический анализ нанофибриллированной целлюлозы и микроструктуры целлюлозной суспензии. Представлены таблицы и графики влияния различных концентраций нановолокон на реологические характеристики цементного теста и механические свойства цементного камня. На основании полученных результатов сделан вывод об эффективности применения нанофибриллярной целлюлозы для улучшения свойств цементного теста и камня. Микроструктурный анализ позволил обнаружить положительное влияние наноцеллюлозы на формирование структуры цементного композита.

Ключевые слова: нано- и микрофибриллярная целлюлоза, концентрация, цементный камень, композит, структура, свойства.

Для цитирования: Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Хирхасова В.И. Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44>

Yu.V. PUHARENKO, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding member of RAACS (tsik@spbgasu.ru),
I.U. AUBAKIROVA, Candidate of Sciences (Engineering), V.I. KHIRKHASOVA, Engineer (post-graduate student)
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, Vtoraya Krasnoarmeiskaya Street, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

Cellulose in Concrete: a New Direction of Development of Construction Nanotechnology

In recent years, fulleroid materials with a maximum particle size of several tens to several hundreds of nanometers, representing a special form of carbon and providing industrially significant effects when they are contained in the composition of raw mixtures in microdoses, have acquired special importance and exceptional interest for building materials science and technology. At the same time, there are nanomaterials capable of constituting a specific alternative to these substances. This article presents the results of experimental studies of the effect of nanofibrillar cellulose on the structure and properties of the cement composite. X-ray spectrometric analysis of nanofibrillated cellulose and microstructure of cellulose suspension was carried out. Tables and graphs of the effect of various concentrations of nanofibers on the rheological characteristics of the cement paste and the mechanical properties of cement stone are presented. Based on the results obtained, it is concluded that nanofibrillar cellulose is effective in improving the properties of cement paste and stone. Microstructural analysis revealed a positive effect of nanocellulose on the formation of the structure of the cement composite.

Keywords: nano- and microfibrillar cellulose, concentration, cement stone, composite, structure, properties.

For citation: Puharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Khirkhasova V.I. Cellulose in concrete: a new direction of development of construction nanotechnology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 39–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44>

В последние десятилетия развитие материаловедения в строительстве, как и в других отраслях, тесно связано с такими понятиями, как наноматериалы, наночастицы, наноструктуры и т. п. При этом, как и прежде, значительное внимание уделяется возможности улучшения функциональных и технологических свойств строительных композитов ультра- и нанодисперсными добавками, которые чаще всего являются продуктами сверхтонкого механического измельчения природного или техногенного сырья. Анализ технической литературы показывает, что заметное улучшение свойств материалов в этом случае достигается лишь при существенном (в размере нескольких процентов) содержании таких добавок в составе основного вещества. Учитывая это, особое значение и исключительный интерес для строительного материаловедения и технологий приобретают материалы фуллероидной структуры с максималь-

ным размером частиц от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, представляющие собой особую форму углерода и обеспечивающие получение промышленно значимых эффектов при содержании их в составе сырьевых смесей в микродозах. Следует отметить определенные успехи в данном направлении, связанные с разработкой наномодифицированных бетонов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками [1–9], что, безусловно, важно для современных железобетонных конструкций, все чаще работающих в жестких условиях повышенных статических и динамических нагрузок, а также других воздействий, в том числе знакопеременных. Вместе с тем существуют определенные трудности с промышленным внедрением таких наноматериалов, связанные, например, со сложностью и многозвенностью химико-технологических переходов и высокой стоимостью ис-

ходного сырья при их получении, но особенно с недостатком и противоречивостью информации по вопросу влияния углеродных наночастиц, в частности нанотрубок, на здоровье человека, а с некоторых пор и на мировую экологию. Учитывая это, ученые предлагают заняться поиском экологически чистых методов производства подобных материалов или серьезно задуматься о способах «очистки» последствий техпроцесса, что, безусловно, приведет к увеличению стоимости нанотрубок. В то же время существуют и другие направления выхода из создавшейся неопределенности, в том числе поиск альтернативных материалов с похожими свойствами, способных обеспечить значительное улучшение качества строительных композитов на наноуровне. Источником таких наноматериалов может стать древесина, а точнее, ее основной компонент – целлюлоза, содержание которой в различных породах дерева составляет 35–50% и которая является природной наносистемой, структурно самоорганизованной на нескольких порядках размерной шкалы. Различные способы химического, физического и механического воздействия на целлюлозосодержащее сырье приводят к получению суб-, микро- и наноразмерных частиц, отличающихся по структуре, размерам, свойствам и соответственно по названиям: микрофибриллярная целлюлоза, микрокристаллическая целлюлоза, наноцеллюлоза и т. д. Данные структуры отличаются высокими механическими характеристиками, сопоставимыми с прочностью и деформативностью углеродных нанотрубок, химической стабильностью, а стоимость их, по некоторым оценкам, в десятки и даже в сотни раз ниже стоимости углеродных фуллероидных наночастиц. Таким образом, потенциал целлюлозы с точки зрения применения диспергированных до наноразмерного уровня элементов структуры, с учетом ее доступности и возобновляемости, открывает новые возможности для разработки и устойчивого развития инновационных технологий производства высококачественных материалов. В некоторых публикациях содержатся сведения об использовании целлюлозных микрофибрилл в сочетании с различными матрицами, такими как полиуретан, полимолочная кислота и крахмал; сообщается о пленочных композитах, изготовленных методом литья. Вместе с тем мало что известно о введении нано- или микрофибриллярной целлюлозы в состав объемных композиционных материалов. Учитывая это, цель настоящей работы заключалась в получении экспериментальных данных для определения перспектив и потенциала целлюлозных микро- и нановолокон как упрочнителя строительных композитов на основе цементной матрицы.

В статье представлены результаты исследований структуры и свойств цементного теста и камня, модифицированного нанофибриллярной целлюлозой (НФЦ), представляющей собой длинные пучки волокон диаметром около 2 нм, с примесью крупных микрофибриллярных структур (МФЦ) размером в

среднем 100 нм (рис. 1). В дальнейшем при изложении полученных экспериментальных данных и их последующего обсуждения для обозначения этого материала принято обобщающее название «наноцеллюлоза» (НЦ).

Традиционно, определенную сложность реализации строительной нанотехнологии представляет процесс введения в смесь и равномерное распределение по ее объему нанообъектов, особенно при их добавлении в микроколичествах. В подобных случаях решение проблемы достигается путем создания в композите непрерывной жидкой фазы в виде раствора или дисперсии [10, 11]. Учитывая это, при проведении экспериментальных исследований использовалась водная дисперсия (суспензия) наноцеллюлозы с $\rho_H=5,7$.

Концентрация сухого вещества в исходной целлюлозной суспензии, определенная с помощью влагомера Элвиз-2 при температуре 105°C, составила 1,7 мас. %, истинная плотность наноцеллюлозы, определенная по методу Ле-Шателье-Кандло, равна 1,56 г/см³.

В результате рентгеноспектрометрического анализа изучен элементный состав водной дисперсии целлюлозных наночастиц. На рис. 2 указаны зоны (спектры) измерения вещественного состава, результаты которого приведены в табл. 1.

Гранулометрический состав (размерный ряд) наноцеллюлозной суспензии, установленный методом рассеивания света с помощью прибора Zetasizer Nano, представлен на рис. 3. Для оценки возможного изменения размеров частиц наноцеллюлозы в водной среде, учитывая их гидрофильность, измерения производились многократно в течение нескольких суток.

По рис. 3 можно заметить, что графические кривые распределения размеров частиц имеют практически полное совпадение, что позволяет судить о постоянстве размерности суспензии во времени.

В качестве другого исходного компонента смеси в ходе исследований был использован портландцемент ЦЕМ-І42,5 Н производства ООО «Петербургцемент», характеристика которого приведена в табл. 2 и 3.

Одной из центральных задач нанотехнологии является определение минимального (критического) количества наномодификатора, при котором уровень улучшения физико-механических характеристик исходного композита становится достаточно заметным. В данном исследовании наночастицы представляют собой волокна целлюлозы, способные благодаря своим уникальным свойствам проявить армирующий эффект по отношению к цементному камню, который в этом случае может рассматриваться как новый самостоятельный композит или как эффективная составная часть (компонент) структуры более высокого порядка, например цементного раствора или бетона.

Известно, что вклад армирующих волокон в увеличение прочности или в улучшение других показате-

Таблица 1
Table 1

Элементный состав суспензии наноцеллюлозы
The elemental composition of the suspension of nanocellulose

№ спектра	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Fe	Итого
Спектр 1	57,63	40,26	0,19	0,32	0,14	0,14	-	-	1,32	-	100
Спектр 2	53,52	40,73	-	0,33	0,38	0,58	0,31	0,27	3,53	0,34	100
Спектр 3	58,89	37,97	-	0,37	0,28	0,45	-	0,18	1,84	-	100
Спектр 4	66,73	22,22	-	0,93	1,13	1,3	-	0,71	6,98	-	100
Спектр 5	60,19	34,97	0,41	0,7	0,4	-	-	-	3,46	-	100
Спектр 6	53,58	41,46	0,4	0,3	-	-	-	-	4,25	-	100
Спектр 7	44,61	48,28	-	0,19	-	5,92	-	-	1	-	100
Макс.	66,73	48,28	0,41	0,93	1,13	5,92	0,31	0,71	6,98	0,34	-
Мин.	44,61	22,22	0,19	0,19	0,14	0,14	0,31	0,18	1	0,34	-

Таблица 2
Table 2

Характеристики портландцемента
Portland cement characteristics

Удельная поверхность, м ² /кг	Равномерность изменения объема (расширения), мм	Средняя активность (МПа) в возрасте		Нормальная густота цементного теста, %
		2 сут	28 сут	
419	0,2	29,9	49,4	29,8

Таблица 3
Table 3

Минеральный и химический состав портландцемента
Mineral and chemical composition of Portland cement

Марка цемента	Минеральный состав, %				Химический состав, %		
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	Cl ⁻
ЦЕМ-I 42,5 Н	62,81	12,87	4,56	11,94	2,79	1,22	0,055



Рис. 1. Структура наноцеллюлозы
Fig. 1. The structure of nanocellulose

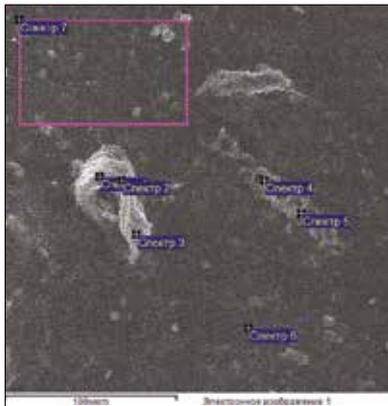


Рис. 2. Электронная фотография водной дисперсии (суспензии) наноцеллюлозы
Fig. 2. An electronic photograph of an aqueous dispersion (suspension) of nanocellulose

телей качества бетона во многом зависит от их степени дисперсности, которая в свою очередь характеризуется поверхностью контакта дисперсной арматуры с цементным камнем в единице объема материала:

$$F = N \cdot p \cdot l = \frac{\mu}{A \cdot l} \cdot \pi \cdot d \cdot l = \frac{4 \cdot \mu}{d},$$

где: μ , A , d , N , p , l – соответственно объемное содержание, площадь поперечного сечения, диаметр, число штук, периметр поперечного сечения, длина армирующих волокон.

Например, расчет указанной характеристики в случае армирования цементного камня синтетическими микроволокнами диаметром 20 мкм показывает, что при минимально необходимой их концентрации в смеси степень дисперсности должна быть $F = 1,6 \text{ мм}^{-1}$. Для получения равного с этим показателя для наноцеллюлозы с учетом приведенных выше размеров частиц ее минимальная доля в цементном камне должна составлять 10^{-5} .

С другой стороны, минимальная концентрация волокон в цементном камне может быть определена по формуле [12]:

$$\mu_{\min} = \frac{R_{\text{ЦК}}}{\left[R_{\text{НЦ}} - \left(2 \frac{E_{\text{НЦ}}}{E_{\text{КЗ}}} + 3,5 \right) R_{\text{КЗ}} + 4,5 R_{\text{ЦК}} \right]},$$

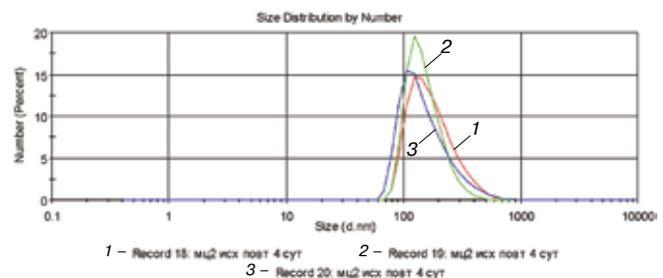


Рис. 3. Гранулометрический состав целлюлозной суспензии
Fig. 3. The particle size distribution of the cellulose suspension

где: $E_{\text{НЦ}}$ и $E_{\text{КЗ}}$ – модули упругости волокон наноцеллюлозы и цементного камня в контактной зоне; $R_{\text{НЦ}}$, $R_{\text{КЗ}}$ и $R_{\text{ЦК}}$ – прочность волокон наноцеллюлозы, контактной зоны и цементного камня.

Исходя из характеристики механических и деформационных свойств цементного камня и наноцеллюлозы [13] минимальное количество нановолокон должно быть в пределах 10^{-4} объемных единиц.

В то же время некоторые зарубежные источники [14, 15] указывают на попытку улучшения свойств цементного бетона путем введения в состав сырьевой смеси наноцеллюлозы в количестве от нескольких долей до нескольких процентов по объему. Возможно, именно «переармирование» и стало причиной получения незначительного эффекта, приведенного в этих работах.

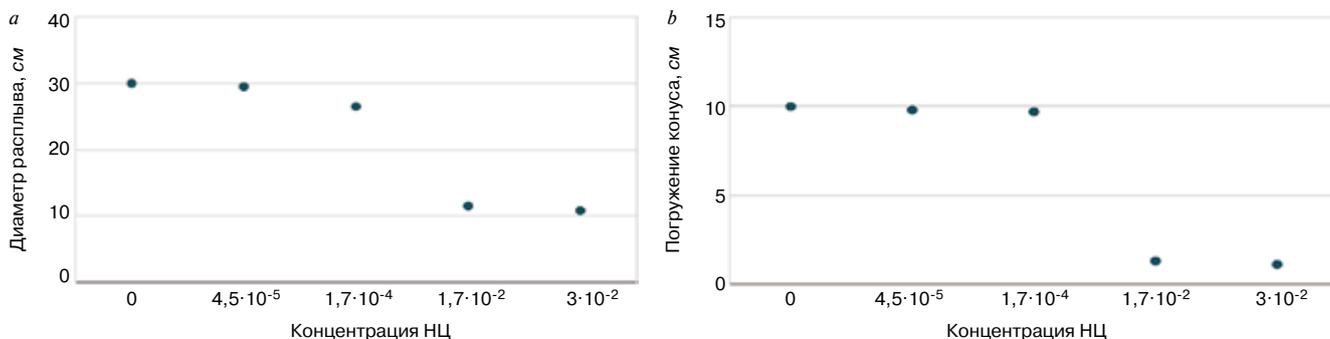


Рис. 4. Влияние количества волокон НЦ на подвижность цементного теста: *a* – расплыв цементного теста на встряхивающем столике; *b* – глубина погружения конуса в цементное тесто

Fig. 4. The effect of the number of nanocellulose fibers on the mobility of the cement paste: *a* – spread of cement paste on a shaking table; *b* – the depth of immersion of the cone in the cement paste

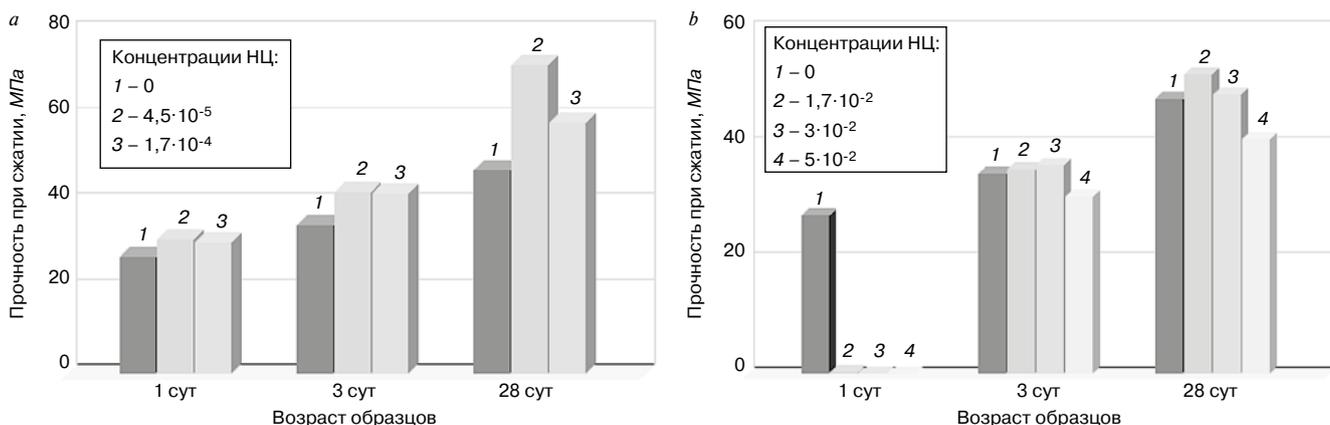


Рис. 5. Влияние количества волокон НЦ на прочность цементного камня: *a* – при малых концентрациях НЦ; *b* – при высоких концентрациях НЦ

Fig. 5. The effect of the number of nanocellulose fibers on the strength of cement stone: *a* – at low concentrations of nanocellulose; *b* – at high concentrations of nanocellulose

Учитывая имеющиеся противоречия и отсутствие достоверных данных по вопросу эффективной доли НЦ в составе композита, в экспериментальной части исследования готовили цементное тесто при постоянном водоцементном отношении В/Ц=0,35 и варьировании содержания наноцеллюлозы на двух уровнях:

- при концентрации 10^{-5} – 10^{-4} по объему, что соответствует представлению о нанотехнологии и ее основополагающих принципов;
- в интервале 1–5% по объему в соответствии с информацией, приведенной в технической литературе.

Из полученных смесей изготавливали образцы размером $40 \times 40 \times 160$ мм, предварительно оценивая влияние НЦ на реологические свойства цементного теста по расплыву конуса на встряхивающем столике по ГОСТ 310.4–84 и по погружению конуса СтройЦНИЛ. В дальнейшем образцы твердели в воздушно-сухих условиях при температуре 18–20°C в течение 28 сут. Результаты проведенных в этот период испытаний представлены на рис. 4–6.

По полученным данным сделаны следующие выводы:

1. Содержание НЦ в микроколичествах практически не влияет на технологические свойства цементного теста, в то время как увеличение ее концентрации

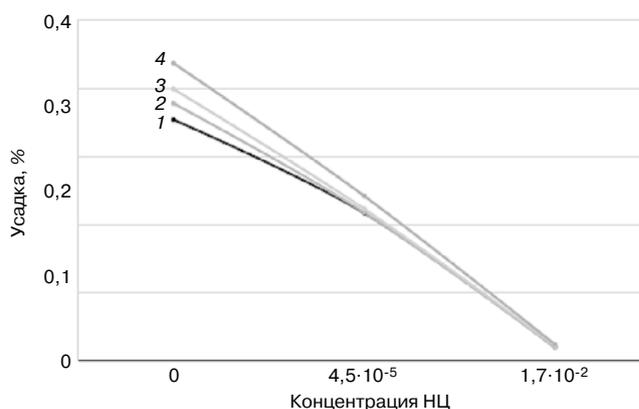


Рис. 6. Влияние количества НЦ на усадку цементного камня в процессе твердения: 1 – 3 сут; 2 – 7 сут; 3 – 14 сут; 4 – 28 сут

Fig. 6. The effect of the amount of nanocellulose on the shrinkage of cement stone during hardening: 1 – 3 days; 2 – 7 days; 3 – 14 days; 4 – 28 days

до уровня нескольких процентов приводит к значительной, практически полной потере подвижности.

2. В отличие от этого влияние НЦ на механические характеристики цементного камня оказывается прямо противоположным: чем меньше насыщение смеси нановолокнами, тем выше прочность композита, которая формируется опережающими темпами начиная с первых суток от начала затворения и в возрасте 28 сут превышает прочность исходного цемент-

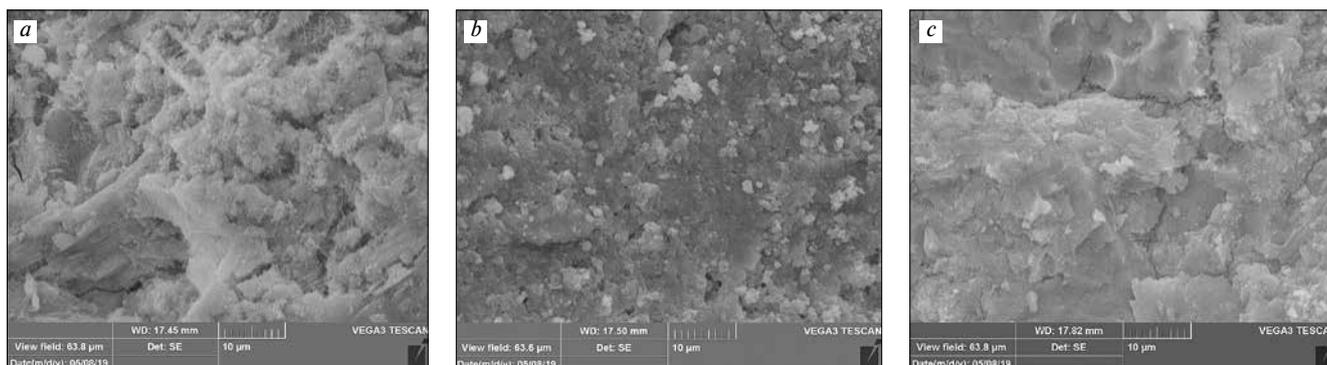


Рис. 7. Структура цементного камня: *a* – без наноцеллюлозы; *b* – модифицированного наноцеллюлозой в концентрации $4,5 \cdot 10^{-5}$; *c* – модифицированного наноцеллюлозой в концентрации 5% по объему

Fig. 7. The structure of cement stone: *a* – without nanocellulose; *b* – modified with nanocellulose at a concentration of $4.5 \cdot 10^{-5}$; *c* – modified nanocellulose at a concentration of 5% by volume

ного камня в 1,6 раза. Можно предположить, что этому способствует, судя по литературным данным и элементному составу, приведенному в табл. 1, наличие в НЦ свободных радикалов в виде гидроксильных и карбоксильных групп, что позволяет считать нановолокна даже не центрами, а активными поверхностями кристаллизации.

3. При высоких концентрациях НЦ в смеси имеет место существенное замедление процесса твердения композита в первые сутки, затем скорость выравнивается по отношению к цементному камню без волокон, и в 28-дневном возрасте прочность образцов достигает или даже несколько превышает прочность неармированного камня. Введение более 3% НЦ по объему приводит к постепенному снижению прочности получаемого композита. Такое влияние НЦ можно объяснить наличием в составе остатков лигнина и других веществ, способных, как известно, сдерживать процессы гидратации цемента в раннем возрасте.

4. Усадка цементного камня в присутствии целлюлозных нановолокон снижается по мере увеличения их содержания в смеси.

Обозначенные выше эффекты отражает и структура исследуемого материала, визуализация которой выполнена с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3SEM (рис. 7).

Список литературы

1. Бальмаков М.Д., Пухаренко Ю.В. Наноконпозиционное материаловедение // *Вестник гражданских инженеров*. 2005. № 3 (4). С. 53–57.
2. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Летенко Д.Г., Староверов В.Д. Модифицирование цементных композитов смешанным нанокуглеродным материалом фуллероидного типа // *Технология бетонов*. 2013. № 12 (89). С. 13–15.
3. Ковалева А.Ю., Беляева Ж.В., Аубакирова И.У., Староверов В.Д. Опыт промышленного применения наномодифицированных бетонных смесей // *Популярное бетоноведение*. 2008. № 3 (23). С. 28–29.
4. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Староверов В.Д. Структура и свойства наномодифицированных цементных систем. *Международ-*

По представленным электронным фотографиям можно судить о существенных изменениях в микроструктуре цементного камня при введении в его состав НЦ в разных количествах.

При низких концентрациях присутствие наноцеллюлозы способствует получению цементного композита с более плотной и однородной даже по сравнению с исходным цементным камнем структурой, которая отличается высокой дисперсностью с характерным размером зерен $0,5 \text{ мкм}$ (рис. 7, *b*). При увеличении доли НЦ до нескольких процентов в цементном камне возникает рыхлая структура, наблюдаются отдельные участки с размерами $20\text{--}40 \text{ мкм}$ и видимыми микротрещинами (рис. 7, *c*).

В заключение следует отметить определенное совпадение полученных данных с результатами зарубежных исследователей [15] о слабом влиянии НЦ на цементные материалы при добавлении ее в смесь в количестве нескольких процентов. Одновременно установлено, что при уменьшении концентрации целлюлозных нановолокон в цементном камне до уровня $10^{-5}\text{--}10^{-4}$ обнаруживается значительное повышение степени их положительного влияния на формирование его структуры и свойств. Таким образом, открываются новые возможности управления качеством строительных материалов на наноуровне.

References

1. Balmakov M.D., Pukharenko Yu.V. Nanocomposite materials science. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2005. No. 3 (4), pp. 53–57. (In Russian).
2. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Nikitin V.A., Letenko D.G., Staroverov V.D. Modification of cement composites with mixed nanocarbon material of fulleroid type. *Tekhnologii betonov*. 2013. No. 12 (89), pp. 13–15. (In Russian).
3. Kovaleva A.Yu., Belyaeva Zh.V., Aubakirova I.U., Staroverov V.D. Experience in the industrial use of nanomodified concrete mixtures. *Populyarnoe betonovedenie*. 2008. No. 3 (23), pp. 28–29. (In Russian).
4. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Nikitin V.A., Staroverov V.D. The structure and properties of nanomodified cement systems. *International Congress*

- ный конгресс «Наука и инновации в строительстве SIB-2008». Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. Воронеж, 2008. Т. 1. Кн. 2. С. 424–429.
5. Рыжов А.С., Поцелуева Л.Н. Наномодифицированный магнезиально-шунгитовый защитный бетон // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. № 2 (12). С. 49–55.
 6. Езерский В.А., Монастырев П.В., Кузнецова Н.В., Стерхов И.И. Перспективы применения наномодифицированного бетона // *Строительные материалы*. 2011. № 9. С. 70–71.
 7. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2013. Т. 5. № 1. С. 24–38.
 8. Бескоровайная О.Н., Бычков Д.С., Гаевская З.А. Быстромонтируемые здания из легкого наномодифицированного бетона // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 1 (16). С. 61–71.
 9. Евельсон Л.И., Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Ротарь Д.В., Кузнецов С.С., Ефремочкин Р.А. Изучение статистической устойчивости результатов фрактального моделирования на примере структуры наномодифицированного бетона // *Строительные материалы*. 2016. № 1–2. С. 48–54.
 10. Пухаренко Ю.В., Никитин В.А., Летенко Д.Г. Наноструктурирование воды затворения как способ повышения эффективности пластификаторов бетонных смесей // *Строительные материалы – Наука. № 8 (приложение к научно-техническому журналу «Строительные материалы»)*. 2006. № 9. С. 11–13.
 11. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Староверов В.Д. Эффективность затворения воды углеродными наночастицами // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 1. 2009. С. 40–45.
 12. Pucharenko Ju., Morozov V. Structural model and strength predicting of fiber-reinforced concrete // *World Applied Sciences Journal 23 (Problems of Architecture and Construction)*. 2013, pp. 111–116. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90023
 13. Jiao L. Su M., Chen L., Wang Y., Zhu H., Dai. Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement // *PLoS ONE*. Vol. 11 (12). e0168422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168422>
 14. Hospodarova V. Stevulova N., Sicakova A. possibilities of using cellulose fibres in building materials // *Materials Science and Engineering. Vol. 96. 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies*. 30 September to 2 October 2015, Riga, Latvia, pp. 1–7.
 15. Reixach R., Claramunt J., Chamorro M. A., Llorens J., Merce Pareta M., Tarres Q., Delgado-Aguilar M. On the path to a new generatiol of cement-based composites through the use of lignocellulosic micro/nanofibres // *Materials (Basel)*. 2019. Vol. 12 (10). DOI: 10.3390/ma12101584
 5. Ryzhov A.S., Potselueva L.N. Nan omodified magnesia-shungite protective concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 2 (12), pp. 49–55.
 6. Yezersky V.A., Monastirev P.V., Kuznetsova N.V., Sterkhov I.I. Prospects for the use of nanomodified concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2011. No. 9, pp. 70–71. (In Russian).
 7. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Strength of nanomodified high-strength lightweight concrete. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: scientific internet journal*. 2013. Vol. 5. No. 1, pp. 24–38. (In Russian).
 8. Beskorovainaya O.N., Bychkov D.S., Gaevskaya Z.A. Prefabricated buildings made of lightweight nanomodified concrete. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2014. No. 1 (16), pp. 61–71. (In Russian).
 9. Evel'son L.I., Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Rotar' D.V., Kuznetsov S.S., Efremochkin R.A. Izuchenie statisticheskoi ustoichivosti rezul'tatov fraktal'nogo modelirovaniya na primere struktury nanomodifitsirovannogo betona. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2016. No. 1–2, pp. 48–54. (In Russian).
 10. Pukharenko Yu.V., Nikitin V.A., Letenko D.G. Nanostructuring of mixing water as a way to increase the effectiveness of plasticizers of concrete mixtures. *Stroitel'nye Materialy. Nauka. No. 8. [Construction Materials. Science. No. 8 (application to the scientific and technical journal "Construction Materials")]*. 2006. No. 9, pp. 11–13. (In Russian).
 11. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Staroverov V.D. The efficiency of water mixing with carbon nanoparticles. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 1, pp. 40–45.
 12. Pucharenko Ju., Morozov V. Structural model and strength predicting of fiber-reinforced concrete. *World Applied Sciences Journal 23 (Problems of Architecture and Construction)*. 2013, pp. 111–116. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90023
 13. Jiao L. Su M., Chen L., Wang Y., Zhu H., Dai. Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement. *PLoS ONE*. Vol. 11(12). e0168422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168422>
 14. Hospodarova V. Stevulova N., Sicakova A. possibilities of using cellulose fibres in building materials. *Materials Science and Engineering. Vol. 96. 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies*. 30 September to 2 October 2015, Riga, Latvia, pp. 1–7.
 15. Reixach R., Claramunt J., Chamorro M. A., Llorens J., Merce Pareta M., Tarres Q., Delgado-Aguilar M. On the path to a new generatiol of cement-based composites through the use of lignocellulosic micro/nanofibers. *Materials (Basel)*. 2019. Vol. 12(10). DOI: 10.3390/ma12101584

В.Н. МОРГУН¹, канд. техн. наук (vlad_morgun@bk.ru);
Л.В. МОРГУН², д-р техн. наук (konstlvm@yandex.ru);
А.Ю. БОГАТИНА³, канд. техн. наук (a.y.ozerskaya@gmail.com)

¹ Южный федеральный университет (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42)

² Донской государственный технический университет (344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

³ Ростовский государственный университет путей сообщения (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Народного Ополчения, 2)

Экспериментальная оценка наноэффектов в технологии пенобетонов

Дано научное обоснование влияния скорости перемешивания сырья на величину сил капиллярного сцепления между дисперсными частицами твердой фазы в пенобетонных смесях. Показано, что интенсивность внешнего энергетического воздействия на сырье управляет особенностями массопереноса при изготовлении пенобетонных смесей и, как следствие, соотношением между количеством ПАВ на границе раздела газ–жидкость и в межпоровом пространстве. Установлено, что причиной изменения величины этих сил является способность молекул ПАВ, обладающих стержнеобразной формой, только на границах раздела фаз газ–жидкость физически связывать максимальное количество воды затворения. Доказано, что фибра из синтетических волокон за счет величины своего поверхностного энергетического потенциала и формы способна управлять скоростью массопереноса сырьевых компонентов на раннем этапе формирования структуры пенобетонов. Экспериментально установлено, что повышение скорости массопереноса на наноуровне, т. е. в период преобладания слабых энергетических взаимодействий между компонентами сырья, положительно влияет на кинетику пластической прочности в пенобетонных смесях и механические свойства отвердевшего материала.

Ключевые слова: пенобетонная смесь, капиллярное сцепление, фибра, наноинициатор, пластическая прочность.

Для цитирования: Моргун В.Н., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Экспериментальная оценка наноэффектов в технологии пенобетонов // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 45–48. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-45-48>

V.N. MORGUN¹, Candidate of Sciences (Engineering);

L.V. MORGUN², Doctor of Sciences (Engineering) (konstlvm@yandex.ru);

A.Yu. BOGATINA³, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ Southern Federal University (105/42, Bolshaya Sadovaya Street, 344006, Rostov-on-Don, Russian Federation)

² Don State Technical University (1, Gagarin Square, 344400, Rostov-on-Don, Russian Federation)

³ Rostov State Transport University (2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, 344038, Rostov-on-Don, Russian Federation)

Experimental Assessment of Nano-Effects in Foam Concrete Technology

The scientific substantiation of the influence of the mixing speed of raw materials on the amount of capillary coupling forces between dispersed particles of the solid phase in foam concrete mixtures is given. It is shown that the intensity of external energy impact on raw materials controls the mass transfer features when manufacturing foam concrete mixtures and, as a result, the ratio between the amount of surfactants at the gas–liquid interface and in the interpore space. It is proved that the fiber from synthetic fibers, due to the size of its surface energy potential and shape, is able to control the speed of mass transfer of raw materials at an early stage of the formation of the structure of foam concretes. It is experimentally established that increasing the speed of mass transfer at the nanoscale, that is, during the predominance of weak energy interactions between raw materials components, positively affects the kinetics of plastic strength in foam concrete mixtures and the mechanical properties of the hardened material.

Keywords: foam concrete mixture, capillary adhesion, fiber, nano-initiator, plastic strength.

For citation: Morgun V.N., Morgun L.V., Bogatina A.Yu. Experimental assessment of nano-effects in foam concrete technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 45–48. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-45-48>

Важнейшим минеральным сырьем планеты являются природные каменные материалы [1, 2], без применения которых не может осуществляться строительство. Практически независимо от вещественной природы и структурных особенностей соотношение между прочностью при сжатии и растяжении редко превышает величину 0,1 [3, 4]. Такое соотношение механических свойств предопределяет высокую материалоемкость строительных конструкций и их малую трещиностойкость [5, 6].

Технология бетона, появившаяся в XIX в., позволила немного уменьшить трудоемкость изготовления строительных камней. Для повышения несущей способности строительных конструкций, работающих

на изгиб и растяжение, в бетоны стали укладывать арматурные каркасы [7]. А еще через век строительная наука предложила строительному комплексу фибробетоны, возможность изготовления которых возникла в результате развития технологий изготовления высокопрочных волокон [8, 9].

В XXI в., по мнению ряда специалистов в области строительного материаловедения [10, 11], структурно-химический метод совершенствования свойств композиционных каменных материалов может способствовать такому развитию технологий, которое обеспечит снижение материалоемкости в строительстве при комплексном улучшении их эксплуатационных свойств.

Методы и материалы

В технике принято считать, что если в результате совершенствования технологии изготовления материала в нем вместе с прочностью растет вязкость разрушения [12], то такое изменение свойств свидетельствует о снижении числа дефектов на межмолекулярном уровне. Известно [13], что слои нанокристаллов, управляющие прочностью и демпфирующими свойствами материалов, получают разными способами, в том числе и осаждением коллоидных частиц на поверхность подложки. Поэтому в технологии бетонов можно полагать, что дисперсное их армирование приведет к появлению нанокристаллов в зонах сцепления цементного камня с фиброй.

Бетонные смеси ячеистой структуры представляют собой сложные композиции, состоящие из грубодисперсных частиц заполнителя (зернистой и/или волокнистой формы) и цемента в воде, внутри которых дисперсно распределены газовые включения. Рассмотрение физических свойств компонентов, составляющих такие смеси, показывает, что по величине истинной плотности они различаются более чем на два порядка.

Поэтому можно утверждать, что длительность периода фазового перехода от вязкого состояния к твердому в связи с действием на них гравитационных и выталкивающих сил будет регламентировать меру их дефектности на микро- и макроуровнях. Указанное будет иметь место потому, что достижение высокой прочности затвердевшего композита возможно только в том случае, если:

- на начальном этапе существования вязкопластичной газонаполненной смеси энергетический потенциал наноинициатора способен обеспечивать требуемую практикой скорость фазового перехода из вязкого в твердое;

- на этапе твердения в структуре композита будут существовать протяженные поверхности раздела фаз (подложки), создающие предпосылки для формирования структуры твердой фазы пониженной дефектности.

Результаты и обсуждение

Были изготовлены две одинаковые по рецептуре бетонные смеси. Гомогенизацию сырья первой осуществляли осторожно, так, чтобы воздухововлечение было минимально возможным. Перемешивание второй выполнили в турбулентном смесителе при скорости рабочего органа 80 с^{-1} . Далее по методике [14] измерили пластическую прочность полученных пенобетонных смесей.

Пластическая прочность первой смеси составила 21,9 Па, второй – 39,2 Па. Показатели пластической прочности отразили тот факт, что перевод большей части ПАВ на границу раздела газ–жидкость привел к повышению сил капиллярного сцепления почти в два раза.

Далее каждая смесь была уложена в стеклянный цилиндр с высотой слоя 500 мм. Расслоение пенобетонной смеси с низким содержанием дисперсной

газовой фазы произошло в течение 18 мин. Пенобетонная смесь, приготовленная в турбулентном смесителе, не расслоилась до завершения процессов схватывания в цементе.

Из опыта следует, что суспензии, в составе которых основной объем введенного пенообразователя располагается в пленках на поверхности раздела фаз газ–жидкость, оставаясь термодинамически неравновесными системами, оказываются способными к достижению седиментационной и агрегативной устойчивости.

Причиной установленного явления следует считать тот факт, что пленки анионоактивных ПАВ только на границах раздела газ–жидкость способны физически удерживать максимальное количество воды [15]. Следовательно, повышение суммарной площади поверхностей раздела газ–жидкость объективно способствует улучшению седиментационной и агрегативной устойчивости пенобетонных смесей.

Экспериментальную оценку влияния дисперсного армирования пенобетонов на скорость фазового перехода из вязкого в твердое и вязкость их разрушения в результате силового воздействия осуществляли следующим образом.

Были приготовлены в турбулентном смесителе две практически одинаковые по рецептуре пенобетонные смеси. Соотношение между вяжущим и заполнителем составляло 1:1. В составе фибропенобетонной смеси вместо 1% молотого песка был введен 1% синтетических волокон длиной 20 мм.

Авторы предположили, что фибра как протяженная поверхность раздела фаз в структуре трехфазной дисперсной системы, какой является любая пенобетонная смесь, может оказать положительное влияние на скорость фазового перехода из вязкого в твердое. Следствием такого влияния должно стать улучшение механических свойств исследуемого материала.

Основанием для предположения послужила фундаментальная закономерность, отражающая тот факт, что на атомарном и наноуровнях величина межчастичного взаимодействия зависит не только от размеров их поверхностного потенциала, но и от формы частиц по уравнению [16]:

$$F = - (A \cdot r) / (m \cdot H^n),$$

где: F – сила притяжения между частицами; H – расстояние между частицами; A – константа, характеризующая суммарное действие ориентационного и дисперсионного факторов; r – размер частицы; m, n – коэффициенты (при взаимодействии шарообразных частиц $m=12, n=2$; шарообразной и протяженной – $m=6, n=2$).

Следовательно, дисперсное армирование волокнами высокообводненной дисперсной системы может создавать предпосылки для возникновения в ее структуре наноэффектов. Экспериментально установлено, что наноинициатор в виде дисперсной арматуры, у которой соотношение длина: диаметр $\gg 1000$, позволил фибропенобетонной смеси достигнуть пласти-

Свойства равноплотных пено- и фибропенобетона
Properties of equal-density foam and fiber concrete

Наименование материала	Пенобетон	Фибропенобетон
Плотность смеси, кг/л	895	862
Пластическая прочность, Па:		
– сразу после укладки в емкость	39,2	55,1
– через 1 ч (нормальные условия твердения)	67,5	108,8
– через 2 ч (нормальные условия твердения)	111	282
Плотность сухого бетона, кг/л	641	612
Прочность при сжатии, МПа	2,86	2,8
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	0,46	1,61

ческой прочности сразу после ее изготовления величины в 53–56 Па. Полученный результат указывает на достоверность вышеприведенного уравнения и отражает влияние энергетического поверхностного потенциала фибры на дополнительное повышение внутренних сил сцепления между сырьевыми компонентами смеси еще на 40%.

Величина внутренних сил сцепления в высокообводненных дисперсных системах определяющим образом влияет на количество дефектов, возникающих в материале под действием гравитационных сил после завершения перемешивания [17]. Полученные значения пластической прочности показали, что введение фибры в пенобетонные смеси способствует росту внутренних сил сцепления между дисперсными частицами и, как следствие, должно:

– повышать устойчивость газонаполненных смесей к негативному воздействию гравитационных сил;

Список литературы

- Боярко Г.Ю. Экономика минерального сырья. Томск: Аудит-Информ, 2000. 361 с.
- Чантурия В.А. Прогрессивные технологии комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья. М.: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2014. 28 с.
- Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Строительный и облицовочный камень. М.: ФГУ ГКЗ, 2007. 28 с.
- Косых А.В., Лохова И.А., Макарова Н.А. Искусственные и природные строительные материалы и изделия. Братск: БрГУ, 2006. 188 с.
- Ефимов В.П. Исследование длительной прочности горных пород в режиме постоянной скорости нагружения // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2007. № 6. С. 37–44.
- Рекомендации по обследованию и оценке состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК, 1987. 36 с.
- Проталинский А.Н. Технология преднапряженного железобетона. Новосибирск: Федеральное агентство по образованию Российской Федерации, Новосибирский гос. арх.-строит. ун-т (СИБСТРИН), 2006. 92 с.
- Железобетон в XXI веке, состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России. М.: Готика, 2001. С. 123–223.
- Гафарова Н.Е. Фибробетон для монолитного строительства // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 3. С. 11–14.
- Сватовская Л.Б., Сычева А.М., Соловьева В.Я., Сурин Д.В., Козин П.А., Старчуков Д.С., Сурков В.Н., Юров О.В., Мандрица Д.П., Ершиков Н.В., Соловьев Д.В. Современные идеи управления свойствами композиционных материалов на основе неорганических вяжущих: Монография. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. 78 с.
- Перцев В.Т. Управление процессами раннего структурообразования бетонов: Монография. Воронеж: ВоронежГАСУ, 2006. 234 с.
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 416 с.
- Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. СПб.: Химия, 1995. 400 с.
- Патент РФ 2316750. Способ определения пластической прочности пенобетонной смеси / Моргун В.Н. Заявл. 03.05.2006. Оpubл. 10.02.2008. Бюл. № 4.

– снижать количество внутренних дефектов в затвердевшем материале.

Экспериментальную проверку рассуждений о влиянии размеров и формы заполнителя на скорость осаждения гидратных новообразований цемента на подложку (поверхность фибры) осуществляли по показателям пластической прочности пенобетонных смесей, прочности на растяжение при изгибе и сжатии затвердевших бетонов (см. таблицу).

Выводы

Научно обосновано и экспериментально подтверждено положительное влияние скорости перемешивания сырьевых компонентов на объем и дисперсность газовой фазы при изготовлении пенобетонных смесей. Показано, что при максимально возможном переводе молекул пенообразователя на границу раздела газ–жидкость пенобетонные смеси обладают повышенной агрегативной и седиментационной устойчивостью.

Рассмотрены и объяснены причины ускорения фазового перехода из вязкого в твердое при насыщении пенобетонных смесей протяженными поверхностями раздела фаз в виде дисперсно-распределенной фибры.

Получено экспериментальное подтверждение того, что фибру в структуре пеносмесей надо рассматривать как наноинициатор, комплексно совершенствующий свойства смесей и затвердевшего бетона.

15. Русанов А.И. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. СПб.: Химия, 1992. 280 с.
 16. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
 17. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуум-бетона. Минск: Наука и техника, 1977. 231 с.
- References**
1. Boyarko G.Yu. Ekonomika mineral'nogo syr'ya [Mineral Economics]. Tomsk: «Audit-Inform». 2000. 361 p.
 2. Chanturiya V.A. Progressivnye tekhnologii kompleksnoi i glubokoi pererabotki prirodno i tekhnogenno mineral'nogo syr'ya [Advanced technologies of complex and deep processing of natural and technogenic mineral raw materials]. Moscow: Institute for the Integrated Development of the bowels of the Russian Academy of Sciences. 2014. 28 p.
 3. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Stroitel'nyi i oblitsovochnyi kamen' [Guidelines for the application of the classification of reserves of deposits and forecast resources of solid minerals. Building and facing stone]. Moscow: FGU GKZ. 2007. 28 p.
 4. Kosykh A.V., Lokhova, I.A., N.A. Makarova. Iskusstvennye i prirodnye stroitel'nye materialy i izdeliya [Artificial and natural building materials and products]. Bratsk: BrGU. 2006. 188 p.
 5. Efimov V.P. Investigation of the long-term strength of rocks in the mode of constant loading speed. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2007. No. 6, pp. 37–44. (In Russian).
 6. Rekomendatsii po obsledovaniyu i otsenke sostoyaniya krupnopanel'nykh kamennykh zdaniy [Recommendations for the examination and assessment of the condition of large-panel and stone buildings]. Moscow: TsNIISK. 1987. 36 p.
 7. Protalinsky A.N. Tekhnologiya prednapryazhennogo zhelezobetona [Technology of prestressed concrete]. Novosibirsk: Federal Agency for Education of the Russian Federation, Novosibirsk State. architectural building. University (SIBSTRIN). 2006. 92 p.
 8. Zhelezobeton v XXI veke, sostoyanie i perspektivy razvitiya betona i zhelezobetona v Rossii [Reinforced concrete in the XXI century, the state and prospects of development of concrete and reinforced concrete in Russia]. Moscow: Gothic. 2001, pp. 123–223.
 9. Gafarova N.E. Fiber-concrete for monolithic construction. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2017. No. 3, pp. 11–14. (In Russian).
 10. Svatovskaya L.B., Sycheva A.M., Solov'eva V.Ya., Surin D.V., Kozin P.A., Starchukov D.S., Surkov V.N., Yurov O.V., Mandritsa D.P., Ershikov N.V., Solov'ev D.V. Sovremennye idei upravleniya svoistvami kompozitsionnykh materialov na osnove neorganicheskikh vyazhushchikh. Monografiya [Modern ideas for managing the properties of composite materials based on inorganic binders. Monograph]. Saint Petersburg: PGUPS. 2015. 78 p.
 11. Pertsev V.T. Upravlenie protsessami rannego strukturoobrazovaniya betonov. Monografiya [Management of processes of early structural formation of concrete. Monograph]. Voronezh: Voronezh GASU. 2006. 234 p.
 12. Gusev A.I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow: FIZMATLIT. 2005. 416 p.
 13. Fridrikhsberg D.A. Kurs kolloidnoi khimii [The course of colloid chemistry]. Saint Petersburg: Khimiya. 1995. 400 p.
 14. Patent RF 2316750. A method for determining the plastic strength of a foam concrete mixture / Morgun V.N. Declared 03.03.2006. Publ. 02.10.2008. Bull. No.4. (In Russian).
 15. Rusanov A.I. Mitselloobrazovanie v rastvorakh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Micelle formation in surfactant solutions]. Saint Petersburg: Khimiya. 1992. 280 p.
 16. Adamson A. Fizicheskaya khimiya poverkhnosti [Physical chemistry of surfaces]. Moscow: Mir. 1979. 568 p.
 17. Bleshchik N.P. Strukturno-mekhanicheskie svoistva i reologiya betonnoi smesi i pressvakuumbetona [Structural and mechanical properties and rheology of concrete mix and press-vacuum concrete]. Minsk: Nauka i tekhnika. 1977. 231 p.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Технология гипсовых отделочных материалов и изделий

Федулов А.А., М: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ», 2018. 240 с.



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

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

Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: mail@rifsm.ru, или оформить заказ на сайте www.rifsm.ru

С.А. ЖДАНОК¹, д-р физ.-мат. наук (seo@art-pte.com); Е.Н. ПОЛОНИНА², инженер,
С.Н. ЛЕОНОВИЧ², д-р техн. наук, иностранный академик РААСН

¹ ООО «Передовые исследования и технологии» (223058, Республика Беларусь, Минский р-н, д. Лесковка, ул. Совхозная, 1, кв. 16)

² Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

Исследование методом ИК-спектроскопии степени активации углеродных наноматериалов для модифицирования конструкционного бетона

Приведены результаты исследований ИК-спектров пропускания углеродных наноматериалов (УНМ), полученных газовым пиролизом и подвергнутых нагреву в присутствии паров воды. Метод инфракрасной спектроскопии позволяет исследовать состав и строение различных веществ. При этом для проведения исследований достаточно совсем небольшого количества материала, а сам материал не требует специальной предварительной подготовки. Для многих систем метод инфракрасной спектроскопии дает возможность получать информацию о строении поверхности, характеризовать центры адсорбции и их взаимодействие с адсорбированным веществом. Целью исследования являлось определение влияния высокотемпературной парогазовой обработки на изменение фазового состава УНМ. Полученные данные объясняют предположенный ранее механизм повышения набора прочности цементного камня.

Ключевые слова: углеродный наноматериал, ИК-спектроскопия, спектрометр, активация, функциональная группа.

Для цитирования: Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н. Исследование методом ИК-спектроскопии степени активации углеродных наноматериалов для модифицирования конструкционного бетона // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-49-53>

S.A. ZHDANOK¹, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics); E.N. POLONINA², Engineer,

S.N. LEONOVICH², Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Member of RAACS (Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)

¹ ООО "Advanced Research and Technologies" (room 16, 1, Sovkhoznyaya Street, Leskovka, Minsk District, 223058, Republic of Belarus)

² Belarusian National Technical University (Belarus, 220013, Minsk, Nezavisimosty Avenue, 65)

IR Spectroscopy Study of the Degree of Activation of Carbon Nanomaterials for Modifying Structural Concrete

The results of studies of IR transmission spectra of carbon nanomaterials (CNM) obtained by gas pyrolysis and subjected to heating in the presence of water vapor are presented. The method of infrared spectroscopy makes it possible to study the composition and structure of various substances. At this, a very small amount of material is sufficient for conducting research, and the material itself does not require special preliminary preparation. For many systems, the method of infrared spectroscopy makes it possible to obtain information about the structure of the surface, characterize the centers of adsorption and their interaction with the adsorbed substance. The purpose of the study was to determine the effect of high-temperature steam-gas treatment on the change in the phase composition of the CNM. The obtained data explain the previously assumed mechanism of increasing the strength set of cement stone.

Keywords: carbon nano-material, IR spectroscopy, spectrometer, activation, functional group.

For citation: S.A. Zhdanok, E.N. Polonina, S.N. Leonovich. IR spectroscopy study of the degree of activation of carbon nanomaterials for modifying structural concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 49–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-49-53>

В ранее представленных статьях [1–4] авторами установлено положительное влияние пластифицирующей добавки, содержащей в своем составе углеродный наноматериал, на свойства бетонных смесей и физико-механические свойства тяжелого бетона.

Применительно к углеродным наноматериалам ИК-спектроскопия является одной из наиболее эффективных и универсальных экспресс-методик выявления их структурных особенностей [5–10]. С помощью данного метода можно получать информацию о дефектах строения, типе примесных соединений и их относительном содержании в углеродном материале. Кроме того, метод ИК-спектроскопии позволяет оценить степень совершенства кристаллической структуры углеродного материала и его однородности, а также определить природу и относительное содержание функциональных групп на его поверхности.

Спектры комбинационного рассеяния света регистрировали при комнатной температуре на ИК-Фурье спектрометре Tenzor-27 (Bruker, Германия) в интервале волновых чисел 400–4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹, с количеством сканов – 100. Образцы готовили пресованием тщательно гомогенизированной смеси со спектрально чистым бромистым калием в массовом соотношении 1:2000.

Образцом сравнения служил исходный УНМ, не подвергавшийся дополнительной обработке [11–13].

Как известно, графит и графитоподобные структуры, в том числе фуллерены и нанотрубки, представлены sp²-гибридизированным углеродом. Для углерода (sp²-гибридизации) в ИК-области колебания неактивны, но проявляются только в спектрах комбинационного рассеяния. Примесные соединения в структуре углерода и хемосорбированная вода изменяют группу симметрии колебаний, делая их

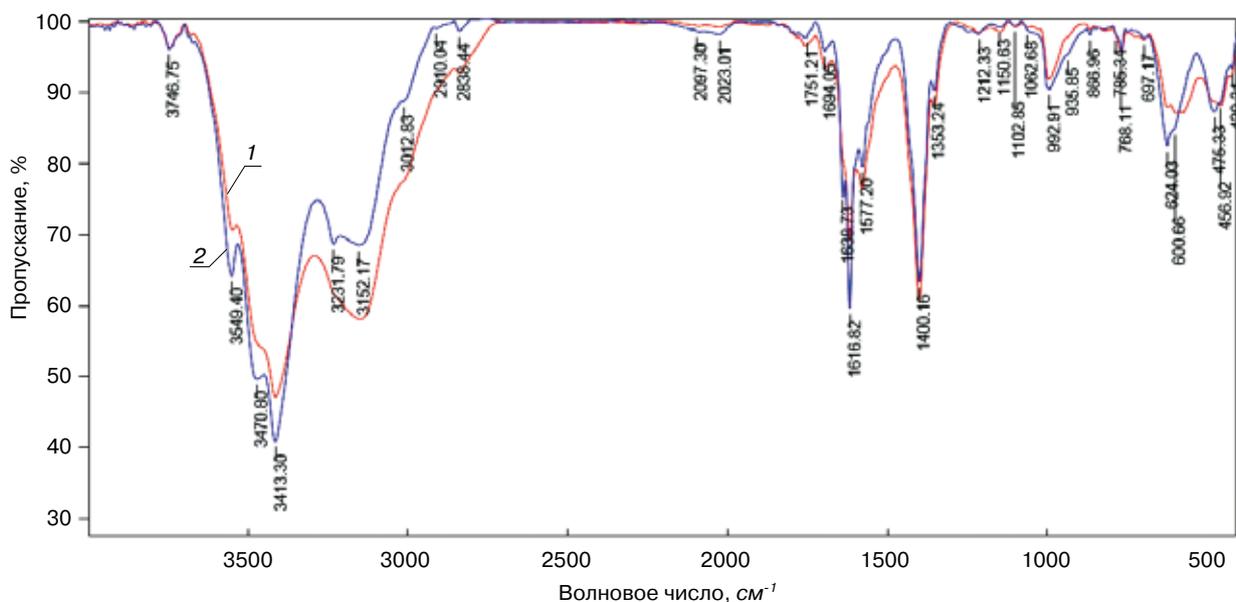


Рис. 1. ИК-спектры исходного и активированного образцов (весь диапазон). ИК-Фурье спектрометр Tenzor-27, образец запрессован в таблетку с KBr -0,4/800 мг: 1 – исходный (красный); 2 – активированный (синий)
Fig. 1. IR spectra of the initial and activated samples (entire range). IR-Fourier spectrometer Tenzor-27, the sample is pressed into a tablet with KBr -0.4/800 mg: 1 – source (red); 2 – activated (blue)

оптически активными в области ИК. В этом случае в диапазоне типичных рамановских частот молекулярных форм sp^2 -гибридизированного углерода, в спектре поглощения также наблюдаются соответствующие полосы – полоса G при $1600–1500\text{ см}^{-1}$ и D – при $1450–1250\text{ см}^{-1}$. Они принадлежат к внутрислойным колебаниям атомов упорядоченных и разупорядоченных графеновых слоев соответственно.

На рис. 1 приведены ИК-спектры исходного и активированного образцов УНМ. На рис. 2 для качественной идентификации прописаны определенные участки ИК-спектров.

В спектре исходного образца углеродных нанотрубок (не прошедших активацию) полоса G является сложной полосой с двумя минимумами при 1617 и 1578 см^{-1} и едва заметным плечом при 1639 см^{-1} . Согласно литературным данным, расщепление этой полосы на две составляющие является признаком многостенных нанотрубок.

Слабо проявляющееся плечо при 1639 см^{-1} обусловлено содержанием в структуре незначительного количества карбонильных групп. Карбонильные группы возникают, по-видимому, за счет адсорбции атмосферной влаги поверхностью углеродных нанотрубок. О наличии некоторого количества кислородсодержащих функциональных групп в исходном образце могут свидетельствовать также полосы поглощения при 1696 и 1754 см^{-1} . Отношение интегральных интенсивностей полос D и G в исходном образце равно ~ 1 , что указывает на достаточно высокую степень разупорядоченности.

В спектре исходных углеродных нанотрубок в области валентных колебаний C–H-групп алкильной группировки ($2950–2800\text{ см}^{-1}$) наблюдаются полосы очень слабой интенсивности. Полоса асимметричных валентных колебаний при 2910 см^{-1} практически

перекрывается широкой полосой валентных колебаний O–H. Такой характер спектра в описанной области, а также отсутствие в спектре полосы деформационных колебаний в области $1470–1450\text{ см}^{-1}$ свидетельствуют о незначительном содержании в материале алкильных групп. Отсутствие деформационных колебаний в области $1470–1450\text{ см}^{-1}$, возможно, объясняется перекрытием полосой D. Следы алкильных групп в ИК-спектре исходных углеродных нанотрубок обусловлены остатками или промежуточными продуктами углеводородов, из которых синтезируют углеродный материал.

В области валентных колебаний OH-групп присутствует широкая полоса с четко определяемыми минимумами. Форма и ширина этой полосы дают основание предполагать присутствие структурированной воды в углеродном каркасе, а не воды, связанной водородными связями. Полосу поглощения с минимумом при 3148 см^{-1} , вероятно, можно отнести к валентным колебаниям C–H_{аром} связи, обусловленной наличием в углеродном материале гидрогенизированного углерода. Слабоинтенсивная полоса при 3546 см^{-1} характерна для валентных колебаний гидроксильных групп.

Активация образца сопровождается кардинальными изменениями в области валентных и деформационных колебаний OH-групп его ИК-спектра. Существенно увеличивается интенсивность полосы валентных колебаний адсорбированной воды, а также полосы валентных колебаний гидроксильных групп (3549 см^{-1}). При этом активация углеродных нанотрубок значительно снижает интенсивность полосы валентных колебаний C–H_{аром} связи.

В ИК-спектре активированного образца плечо при 1639 см^{-1} выделяется в самостоятельную, достаточно интенсивную полосу. Это позволяет говорить об уве-

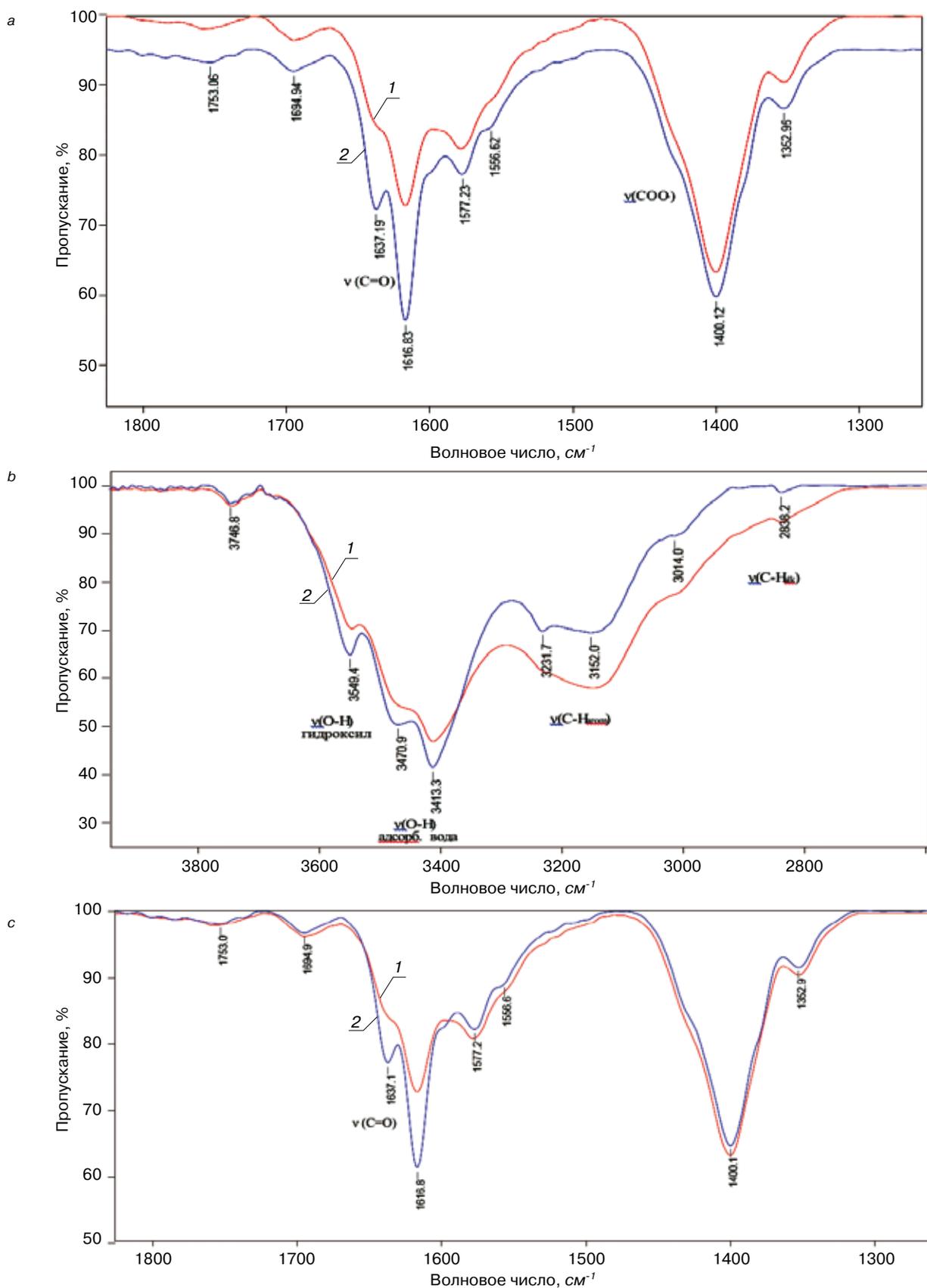


Рис. 2. ИК-спектры исходного и активированного образцов; ИК-Фурье спектрометр Tensor-27, образец запрессован в таблетку с KBr-0,4/800 мг: *a* – диапазон, включающий область колебаний карбоксильной группы; *b* – диапазон, включающий область валентных колебаний гидроксила; *c* – диапазон, включающий область колебаний карбонильной группы; 1 – исходный (красный); 2 – активированный (синий)

Fig. 2. IR spectra of the initial and activated samples. Tensor-27 FT-IR spectrometer, the sample is pressed into a tablet with KBr-0.4/800 mg: *a* – range, including the region of vibration of the carboxyl group; *b* – range, including the region of stretching vibrations of hydroxyl; *c* – range including the region of vibration of the carbonyl group; 1 – source (red); 2 – activated (blue)

Параметр	Температура нагрева наноуглерода, °С	
	20	900
Характер поверхности наноуглерода (время впитывания капли воды в углеродный наноматериал)	более 30 мин	менее 1 с

личении в процессе активации в структуре углеродных нанотрубок количества карбонильных групп.

Все эти изменения в спектрах позволяют предполагать, что реакционноспособными центрами для функционализации углеродного материала могут являться места локализации групп, содержащих С–Н связь. Причем на основании сравнительного анализа ИК-спектров исходного и активированного образцов можно предполагать, что свойства и области применения углеродных нанотрубок будут определять не только алкильные группы. Следует отметить, что содержание алкильных групп в активированном углеродном материале невелико.

Исходный углеродный материал плохо смачивается водой, так как алкильные группы и С–Н-группы, по-видимому, и определяют гидрофобный характер поверхности.

Влияние высокотемпературной активации на характер поверхности наноуглерода (см. таблицу).

Соотношение интенсивностей полос D и G характеризует степень дефектности графеновых слоев.

Список литературы

1. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталеv Б.М., Коледа Е.А. Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода // *Строительные материалы*. 2018. № 6. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-760-6-67-72>
2. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталеv Б.М., Коледа Е.А. Влияние пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал, на свойства самоуплотняющегося бетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 6 (71). С. 76–85.
3. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталеv Б.М., Коледа Е.А. Физико-механические характеристики бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 1. С. 14–20.
4. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталеv Б.М., Коледа Е.А. Влияние пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода в самоуплотняющейся бетонной смеси на ее технологические свойства // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 2. С. 391–396.
5. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия. М.: Мир, 1982. 328 с.

У активированного образца углеродных нанотрубок степень дефектности графеновых слоев составляет 0,86, в то время как у исходного – 1,04. Снижение степени дефектности графеновых слоев дает основание говорить о упорядочении структуры углеродного материала в процессе активации.

Таким образом, анализ ИК-спектров исходного и активированного образцов углеродных нанотрубок обнаруживает появление в углеродном материале карбонильных и гидроксильных функциональных групп. Так как карбонильные и гидроксильные группы являются составляющими карбоксильной группы, одновременное присутствие в ИК-спектре и увеличение их интенсивности в процессе активации позволяют сделать заключение об образовании карбоксильных групп в углеродных нанотрубках в результате их функционализации.

Заключение

На основании спектроскопических исследований показано, что реакционноспособными центрами для функционализации углеродного материала могут быть места локализации С–Н-групп, связанных с ароматическими графеновыми кольцами. Кроме того, на основании ИК-спектра можно сделать вывод, что в процессе активации также наблюдается значительное упорядочение структуры углеродного материала, что приводит к повышению прочности конструкционного бетона.

References

1. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khrustalev B.M., Koleda E.A. Strength enhancement of concrete with a plasticizer on the basis of nano-structured carbon. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 6, pp. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-760-6-67-72> (In Russian).
2. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khrustalev B.M., Koleda E.A. The effect of plasticizing additives containing carbon nanomaterial on the properties of self-compacting concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 6 (71), pp. 76–85. (In Russian).
3. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khrustalev B.M., Koleda E.A. Physico-mechanical characteristics of concrete modified with a plasticizing additive based on nanostructured carbon. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. Vol. 92. No. 1, pp. 14–20. (In Russian).
4. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khrustalev B.M., Koleda E.A. The influence of plasticizing additives based on nanostructured carbon in a self-compacting concrete mixture on its technological properties. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2019. Vol. 92. No. 2, pp. 391–396. (In Russian).
5. Smit A. *Prikladnaya IK-spektroskopiya* [Applied IR-Spectroscopy]. Moscow: Mir. 1982. 328 p.
6. Mikhailova E.S., Ismagilov Z.R., Kuznetsov V.V., Podyacheva O.Yu., Chichkan' A.S., Sal'nikov A.V.,

6. Михайлова Е.С., Исмагилов З.Р., Кузнецов В.В., Подъячева О.Ю., Чичкань А.С., Сальников А.В., Чесноков В.В. Установка для подготовки и проведения ИК-спектроскопических исследований углеродных наноматериалов // *Вестник КузГТУ*. 2017. № 4 (122). С. 155–163.
7. Кесслер И. Методы инфракрасной спектроскопии в химическом анализе. М.: Мир, 1964. 288 с.
8. Иогансен А.В. Структурно-групповой анализ по инфракрасным спектрам // *Химия и технология топлив и масел*. 1962. № 5. С. 16–22.
9. Зинюк Р.Ю., Балыков А.Г., Гавриленко И.Б., Шевяков А.М. ИК-спектроскопия в неорганической технологии. Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1983. 158 с.
10. Овчинников М.М., Лавриенко М.В., Подгорный Г.Н., Пахомов П.М. Изучение аллотропных форм углерода методом ИК-спектроскопии // *Физико-химия полимеров: синтез, свойства и применение*. 2003. № 9. С. 44–49.
11. Жданок С.А. [и др.] Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы // *Вестник БНТУ*. 2009. № 3. С. 5–22.
12. Патент 2839 РБ, МПК В82В 3/00. Установка для получения углеродных наноматериалов / Жданок С.А., Крауклис А.В., Самцов П.П., Волжанкин В.М. Опубл. 30.06.2006.
13. Патент 15341 РБ, МПК7 С 01В 31/02, В 82В 3/00. Способ получения углеродных наноразмерных материалов / Жилинский В.В., Дроздович В.Б., Жданок С.А., Жарский И.М. Опубл. 22.08.2012.
- Chesnokov V.V. Installation for the preparation and conduct of IR spectroscopic studies of carbon nanomaterials. *Vestnik KuzGTU*. 2017. No. 4 (122), pp. 155–163. (In Russian).
7. Kessler I. *Metody infrakrasnoi spektroskopii v khimicheskom analize* [Methods of infrared spectroscopy in chemical analysis]. Moscow: Mir. 1964. 288 p.
8. Iogansen A.V. Infrared structural group analysis. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1962. No. 5, pp. 16–22. (In Russian).
9. Zinyuk R.Yu., Balykov A.G., Gavrilenko I.B., Shevyakov A.M. *IK-spektroskopiya v neorganicheskoj tekhnologii* [IR spectroscopy in inorganic technology]. Leningrad: Khimiya. 1983. 158 p.
10. Ovchinnikov M.M., Lavrienko M.V., Podgornyi G.N., Pakhomov P.M. The study of allotropic forms of carbon by IR spectroscopy. *Fiziko-khimiya polimero: sintez, svoistva i primenenie*. 2003. No. 9, pp. 44–49. (In Russian).
11. Zhdanok S.A. [i dr.] Nanotechnology in building materials science: reality and prospects. *Vestnik BNTU*. 2009. No. 3, pp. 5–22. (In Russian).
12. Patent 2839 Republic of Belarus, IPC B82B 3/00. Zhdanok S.A., Krauklis A.V., Samtsov P.P., Volzhankin V.M. Installation for producing carbon nanomaterials. Publ. 06/30/2006 (In Russian).
13. Patent 15341 Republic of Belarus, IPC7 C 01B 31/02, B 82B 3/00. Zhilinsky V.V., Drozdovich V.B., Zhdanok S.A., Zharsky I.M. A method of producing carbon nanoscale materials. Publ. 08/22/2012. (In Russian).

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА**

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**
Trade Fair for Construction Materials

★ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ:
Салон станков, оборудования, технологий и сырья
для индустрии керамической промышленности

КЕРАМБРИКТЕХ
SERAMBRICKTECH

Переработка и управление отходами

RWEXPO
RECYCLING WASTE EXPO

26.01 | 29.01
МОСКВА 2021

www.osmexpo.ru

А.П. СВИНЦОВ, д-р техн. наук (svintsovap@rambler.ru),
АББАС АБДУЛХУССЕЙН АБД НУР, магистр (аспирант) (abbas652002@gmail.com),
АБДЕЛЬ-САТЕР АББАС, магистр (аспирант) (abbas.h.sater@gmail.com),
А.Н. СОРОКИН, бакалавр (магистрант) (sorokinalexei37@gmail.com)

Российский университет дружбы народов (117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)

Влияние наномодифицированной добавки на подвижность бетонных смесей

Монолитное строительство является одной из самых перспективных технологий, применяемых при возведении различных зданий и сооружений. Появление широкого ряда новых материалов и инновационных строительных технологий значительно упрощает процесс монолитного возведения зданий и сооружений, делая его более экономичным и быстрым. Бетон является одним из ведущих строительных материалов. Одной из основных технических и технологических задач производства является проектирование состава бетона, улучшение его качества и снижения себестоимости. Целью исследования является разработка рекомендаций по проектированию бетонных смесей с заданной подвижностью и пониженным риском сегрегации компонентов при производстве работ. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния комплексной добавки, состоящей из наномодифицированного суперпластификатора и воздухововлекающего компонента, на реологические свойства бетонной смеси позволило предложить рекомендации по проектированию композиционных составов. Наномодифицированная добавка представляет собой сложный комплекс в составе бетона с прочностью при осевом сжатии 15–20 МПа. Применение комплексной добавки позволяет получать бетонные смеси с заданной подвижностью и с минимальным риском расслаиваемости. Экспоненциальное уравнение регрессии позволяет прогнозировать потребность наномодифицированной добавки для получения требуемой подвижности бетонной смеси.

Ключевые слова: цемент, бетон, подвижность, комплексная добавка, наномодификатор, монолитное возведение зданий.

Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН «5-100».

Для цитирования: Свинцов А.П., Аббас Абдулхуссейн Абд Нур, Абдель-Сатер Аббас, Сорокин А.Н. Влияние наномодифицированной добавки на подвижность бетонных смесей // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 54–59.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-54-59>

A.P. SVINTSOV, Doctor of Sciences (Engineering) (svintsovap@rambler.ru), ABBAS ABDULHUSSEIN ABD NOOR, Postgraduate student (abbas652002@gmail.com), ABBAS ABDEL-SATER, Postgraduate student (abbas.h.sater@gmail.com), A.N. SOROKIN, Bachelor (Graduate Student) (sorokinalexei37@gmail.com) Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University) (6, Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation)

Influence of Nano-Modified Additives on the Mobility of Concrete Mixture

Monolithic construction is one of the most promising technologies used in the construction of various buildings and structures. The emergence of a wide range of new materials and innovative construction technologies greatly simplify the process of monolithic construction of buildings and structures, making it more economical and fast. Concrete is one of the leading building materials. One of the main technical and technological tasks of production is to design the composition of concrete, improve its quality and reduce costs. The aim of the study is to develop recommendations for the design of concrete mixtures with a given mobility and a reduced risk of segregation of components in work processes. Theoretical and experimental study of the effect of a complex additive consisting of a Nano-modified superplasticizer and an air-entraining component on the rheological properties of the concrete mixture allowed to offer recommendations for the design of composite compositions. Nano-modified additive is a complicated complex of concrete with an axial compressive strength of 15–20 MPa. Application of a complex additive allows to receive concrete mixes with the set mobility and with a minimum risk of delamination. The exponential regression equation allows predicting the need for a Nano-modified additive to obtain the required mobility of the concrete mixture.

Keywords: cement, concrete, mobility, complex additive, nanomodifier, monolithic construction of buildings.

The publication was prepared with the support of the RUDN Program “5-100”.

For citation: Svintsov A.P., Abbas Abdulhussein Abd Noor, Abbas Abdel-Sater, Sorokin A.N. Influence of nano-modified additives on the mobility of concrete mixture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 54–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-54-59>

Монолитное домостроение постоянно развивается и совершенствуется. Постоянное развитие строительных технологий и их интенсификация предъявляют все более высокие требования к качеству строительных материалов, в особенности бетона, используемого для промышленного и жилищного строительства. В нормальных условиях цементное тесто и бетонные смеси могут сохранять технологические свойства в течение определенного времени. Однако существуют факторы, способные изменить скорость гидратации цемента: температура, удельная поверх-

ность цемента, содержание щелочей, содержание C_3A , гипса, наличие в цементе минеральных и органических добавок, а также наличие химических добавок для бетона [1–4]. В настоящее время широко применяются добавки, позволяющие существенно повысить удобоукладываемость бетонных смесей: суперпластификаторы и гиперпластификаторы [5–7]. В качестве суперпластификаторов используются добавки на основе сульфированных нафталинформальдегидных смол (СНФ), снижающие водопотребность бетонной смеси на 20–30%, в качестве гиперпласти-

фикаторов – добавки на основе поликарбоксилатов, водоредуцирующая способность которых оценивается в 30–40% [8]. Добавка СНФ в отличие от поликарбоксилатов обладает хорошей совместимостью с различными цементами. Влияние суперпластификатора на характеристики цементной пасты зависит от его типа и дозировки [9].

Одной из основных технических и технологических задач производства является проектирование состава бетонной смеси на наномасштабном уровне: разработка новых добавок с использованием наноматериалов. Использование нанотехнологий позволит проектировать материалы для их конкретного применения. Среди всех наноматериалов наиболее используемым является нанокремнезем (нано-SiO₂). Его применение в пасте, растворе и бетоне является способом повышения их свойств. Оптимальное количество нанокремнезема для использования все еще противоречиво и определяется в процессе исследования [10]. Выявлен диапазон нанодобавки кремнезема, установлено ее влияние на регулирование реологических свойств, улучшение прочностных характеристик и долговечность цементобетонных композитов [11]. Производственный опыт показывает, что для получения высокого качества поверхности внутренних стен и перекрытий и снижения трудоемкости бетонных работ необходимо применять бетонные смеси с подвижностью 15–25 см. Однако для бетонов прочностью при осевом сжатии 15–20 МПа подбор смесей представляет определенные трудности, которые заключаются в том, что без химических добавок и даже с применением суперпластификаторов бетонные смеси имеют тенденцию к расслоению. Это происходит не всегда, и предвидеть место вероятного расслоения бетона практически невозможно.

Анализ научно-технической информации показывает, что исследования, направленные на изыскание и использование новых, более эффективных составов бетонных смесей со специальными добавками, представляются актуальными и имеющими практическую значимость. Несмотря на то что в технологии бетонирования используется большое количество индивидуальных и комплексных модификаторов, влияние многих из них на технологические свойства и формирование структуры цементной пасты еще недостаточно исследовано.

Целью данной работы явилось исследование влияния наномодифицированного состава комплексной добавки на подвижность бетонной смеси с пониженной расслаиваемостью при укладке. Синергический эффект совместного использования наномодифицированных компонентов комплексной добавки позволяет получать бетонные смеси с заданной подвижностью и с пониженным риском расслаиваемости.

Материалы и методы исследования

Для получения бетона класса С12/15 использованы следующие материалы: портландцемент Цем I 42,5Н,

Таблица 1
Table 1

Составы бетонных смесей для бетона
класса С12/15 без добавок
Compositions of concrete mixtures for concrete
class C12/15 without additives

Материал	Масса, 1 м ³		
	Номер смеси		
	1	2	3
Цемент 42,5 (кг)	230	270	300
Щебень 20 мм (кг)	550	550	525
Щебень 10 мм (кг)	550	550	525
Песок строительный (кг)	750	700	690
Вода (л)	150	150	150
Водоцементное отношение (В/Ц)	0,65	0,56	0,5

Таблица 2
Table 2

Наномодифицированный суперпластификатор
Nanomodified superplasticizer

Название	Количество (% от массы цемента)				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1
СНФ	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Наноструктурированный SiO ₂	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

предел прочности при осевом сжатии в возрасте 2 сут – 22,8 МПа, в возрасте 28 сут – 49,1 МПа; песок строительный карьерный с модулем крупности $M_{кр}=2,05$; щебень гранитный с размером фракций 5–20 мм; суперпластификатор (СНФ), содержит сульфированные поликонденсаты до 82–84%, натриевый сульфат – 8–10%; воздухововлекающая добавка в виде концентрата смолы древесной омыленной (СДО) – 50–55% темно-коричневого цвета; нанокремнезем – порошок белого цвета нано-SiO₂ в аморфной форме с размерами частиц в среднем 20 нм, удельной поверхностью 122,17 м²/г, массовая доля SiO₂ – 99,8%.

Представленные материалы использованы для приготовления бетонных смесей (табл. 1). Проектирование бетонной смеси выполнено в соответствии с требованиями стандартов России 27006–86, 7473–2010 и с учетом требований АСІ 211.1–91.

Для решения технологических задач бетонирования к исследованию приняты добавки, позволяющие получить бетонные смеси с заданными свойствами. Для исследования влияния наномодифицированной комплексной добавки на подвижность, расслаиваемость и технологичность бетонных смесей использованы композиции, включающие суперпластификатор (СНФ), воздухововлекающую добавку (СДО), наноструктурированный SiO₂ (табл. 2).

Для улучшения гомогенности бетонной смеси СНФ+SiO₂ дополнена воздухововлекающей добавкой СДО, %: 0,01; 0,05; 0,07.

Из полученных смесей изготовлены образцы-кубы размером 100×100×100 мм. Полученная бетонная смесь использована для определения ее подвижности



Рис. 1. Бетонные образцы: 1, 2 – с гомогенной структурой; 3 – с явно выраженной сегрегацией компонентов

Fig. 1. Concrete samples: 1, 2 – with a homogeneous structure; 3 – with pronounced segregation of components

и расслаиваемости. В соответствии с планом эксперимента минимальное количество образцов на каждое исследование принято $n=5$. Бетонные образцы извлечены из форм через 24 ч. Хранение бетонных образцов осуществлялось в камере нормального твердения с автоматическим регулированием температуры и влажности воздуха в течение 28 сут. На рис. 1 представлены бетонные кубики с гомогенной структурой и с явно выраженной сегрегацией компонентов.

Образцы с гомогенной структурой получены из бетонной смеси с комплексной добавкой, содержащей СДО в количестве 0,05% от массы портландцемента. Образцы с явно выраженной сегрегацией компонентов получены из бетонной смеси, включающей только СНФ (рис. 1, 3) и СНФ+nanoSiO₂ (рис. 1, 1, 2).

Для экспериментальной проверки наномодифицированной добавки в производственных условиях использована опалубка перекрытия пятиэтажного здания. Опалубка снабжена утеплителем, выполненном из матов толщиной 50 мм из минеральной ваты. Для хранения контрольных образцов использован закрытый контейнер, утепленный матами толщиной 50 мм, выполненными из минеральной ваты. Этим обеспечены одинаковые условия твердения бетонного перекрытия и контрольных образцов.

Экспериментальное изучение бетонных смесей и бетонных образцов в соответствии с представленными процедурами позволило получить данные, соответствующие цели исследования.

Результаты и их обсуждение

Исследование подвижности бетонных смесей.

Исследование свойств бетонных смесей выполнено с постоянным объемом воды затворения и переменным количеством портландцемента. Это позволило создать условия равной начальной подвижности бе-

тонной смеси до введения наномодифицированного суперпластификатора. Подвижность бетонной смеси определялась осадкой нормального конуса и диаметром его расплыва. СНФ способствует увеличению сроков схватывания. Для нейтрализации влияния указанного фактора на бетонную смесь представляет интерес использование СНФ+SiO₂ в соотношении (0,2–1)+0,1. При гидратации цемента SiO₂ позволяет связать гидроксид кальция, выделяющегося при гидратации алита в гидроксилаты. На рис. 2 представлены диаграммы изменения подвижности бетонной смеси в зависимости от количества введенного СНФ+SiO₂.

Основным показателем эффективности действия суперпластификаторов на бетонную смесь является степень их разжижающей способности. За эталон сравнения принята смесь без добавок с осадкой конуса 2–6 см.

Особенность пластифицирующего воздействия СНФ+SiO₂ на бетонную смесь заключается в том, что в диапазоне дозировок от 0,2 до 0,6% подвижность бетонной смеси интенсивно нарастает. При начальной одинаковой подвижности смесей с В/Ц=0,65; 0,56; 0,5 осадка конуса составляет в среднем $h_0=2,7$ см, а расплыв конуса – $D_0=21,3$ см. Введение суперпластификатора в количестве 0,2% от массы цемента позволяет получить малоподвижную бетонную смесь с осадкой конуса $h_{0,2\%}=6; 8$ и 9 см для В/Ц=0,65; 0,56; 0,5 соответственно. Прирост осадки конуса составляет в среднем 9,8%. При этом расплыв конуса увеличивается до $D_{0,2\%}=25; 30$ и 36 см для В/Ц=0,65; 0,56; 0,5 соответственно. Прирост расплыва конуса составляет в среднем 3,6%. Введение суперпластификатора в количестве 0,6% от массы портландцемента увеличивает осадку конуса, которая составляет $h_{0,6\%}=15; 18$ и 20 см для В/Ц=0,65; 0,56; 0,5 соответственно. Расплыв конуса составляет в среднем $D_{0,6\%}=46$ см, что соответствует приросту 2,9%. Увеличение количества суперпластификатора до 0,6% от массы портландцемента создает высокоподвижную смесь. В диапазоне добавок от 0,2 до 0,6% прирост осадки конуса составляет в среднем 7,6% на каждый шаг увеличения количества добавки. Прирост расплыва бетонной смеси составляет в среднем 3,6% на шаг увеличения количества добавки. При дальнейшем увеличении количества добавки от 0,6 до 1% от массы цемента прирост осадки конуса снижается и составляет в среднем 1,6% на каждый шаг количества добавки. Прирост расплыва бетонной смеси также снижается и составляет в среднем 2,1% на шаг увеличения количества добавки. Анализ диаграмм показывает, что наибольший пластифицирующий эффект образуется при количестве нанодобавки в диапазоне от 0,2 до 0,6% от массы портландцемента. Пластифицирующее воздействие нанодобавки изменяется по закону нормального логарифма с коэффициентами детерминации $R^2=0,97–0,99$.

Влияние СНФ+SiO₂ возрастает с увеличением его дозировки (рис. 2). Установлено также, что увеличе-

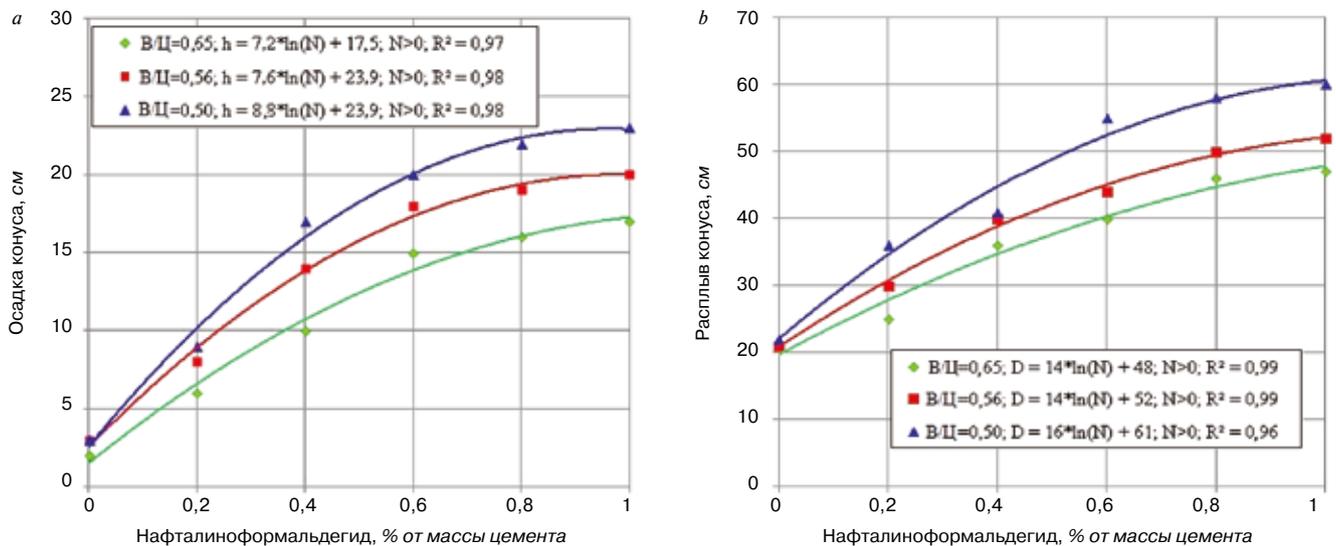


Рис. 2. Изменение подвижности бетонной смеси: а – осадка конуса; б – расплыв конуса
 Fig. 2. Change in the mobility of the concrete mixture: а – sediment cone; б – cone spread

ние количества цемента в смеси способствует повышению влияния СНФ+SiO₂. Аналогичные данные получены в [1, 6, 8] при использовании ординарного СНФ.

На основе экспериментальных данных разработаны эмпирические математические модели прогнозирования осадки конуса и расплыва бетонной смеси. Количество СНФ+SiO₂, необходимое для получения требуемых индикаторов подвижности бетонной смеси, определяется по формулам:

– для осадки конуса:
 $N_h = 0,06e^{0,14h}$; $R^2=0,987$; (1)

– для расплыва бетонной смеси:
 $N_D = 0,03e^{0,051D}$; $R^2=0,929$; (2)

где N_h , N_D – количество СНФ+SiO₂ (% от массы цемента) для осадки конуса и для расплыва бетонной смеси соответственно; h , D – проектные значения соответственно осадки конуса и расплыва бетонной смеси.

Математические модели (1) и (2) разработаны методом наименьших квадратов и связывают параметры необходимой подвижности с концентрацией

СНФ+SiO₂. Применение разработанных моделей позволяет проектировать бетонные смеси на основе задаваемых параметров подвижности.

Для верификации предложенных формул выполнены расчет и экспериментальное приготовление бетонных смесей с определением осадки конуса и расплыва смеси. Результаты верификации представлены в табл. 3.

Расслаиваемость бетонной смеси. Повышение подвижности бетонной смеси связано с риском ее расслоения. Это особенно характерно для бетонов С12/15. Расслаиваемость бетонной смеси происходит из-за того, что наибольшее количество крупного заполнителя перемещается в нижнюю часть бетонированной конструкции. Цементная паста и мелкий заполнитель оказываются в верхней части конструкции. Исследование бетонной смеси на расслаиваемость выполнено по критерию раствооротделения. На рис. 3 представлены диаграммы изменения раствооротделения бетонной смеси.

Анализ диаграмм показывает, что в диапазоне количества суперпластификатора от 0,2 до 0,6% от массы портландцемента показатель раствооротделения имеет относительно стабильные значения с некоторой тенденцией к снижению. В диапазоне от 0,6 до 1% раствооротделение снижается. На величину раствооротделения оказывает влияние не только количество суперпластификатора, но и водоцементное отношение. Увеличение количества портландцемента способствует снижению раствооротделения. При В/Ц=0,5 раствооротделение ниже в среднем на 33,3%, чем при В/Ц=0,56, и на 36,6%, чем при В/Ц=0,65. Эта особенность объясняется тем, что цементная паста с большей густотой сдерживает сегрегацию компонентов. В целом при введении суперпластификатора от 0,2 до 1% от массы портландцемента показатель раствооротделения превышает допустимые значения на 137–250%. Высокие значе-

Таблица 3
 Table 3

Показатели верификации расчетных моделей определения количества добавки СНФ+SiO₂ (% от массы цемента)

Verification indicators of calculation models for determining the amount of addition of sulfonated naphthalene formaldehyde resins + SiO₂ (% by weight of cement)

Требуемая осадка конуса h (см)	6	12	20
Расчетное количество СНФ+SiO ₂ N_h (% от массы цемента)	0,15	0,34	1
Фактическая осадка конуса h_f (см)	7	14	21
Требуемый расплыв D (см)	35	45	50
Расчетное количество СНФ+SiO ₂ N_D (% от массы цемента)	0,17	0,29	0,38
Фактический расплыв D_f (см)	36	43	52

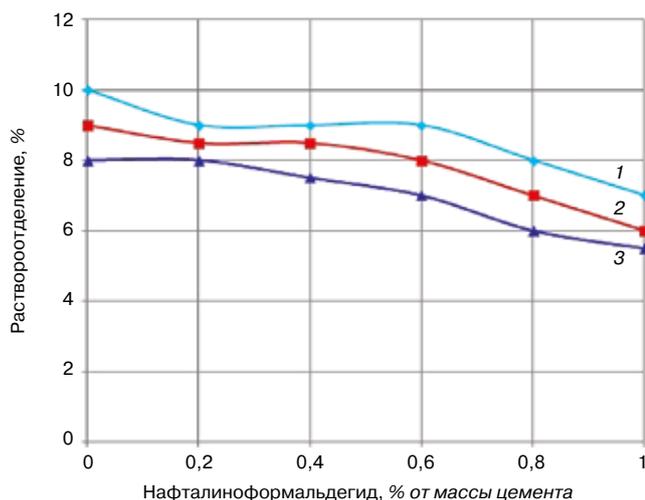


Рис. 3. Изменение раствороотделения бетонной смеси: 1 – В/Ц=0,65; 2 – В/Ц=0,56; 3 – В/Ц=0,5

Fig. 3. The change in the solution separation of the concrete mixture: 1 – W/C=0,65; 2 – W/C=0,56; 3 – W/C=0,5

ния раствороотделения служат маркерами риска сегрегации бетонной смеси.

Для снижения риска сегрегации компонентов бетонной смеси предложено СНФ+SiO₂=(0,2–1)+0,1) дополнить воздухововлекающей добавкой. В качестве воздухововлекающей добавки принята смола древесная омыленная (СДО) в дозировке (%) 0,01; 0,05; 0,07. Самостоятельное введение СДО повышает подвижность бетонной смеси. Совместное введение воздухововлекающего компонента и наносуперпластификатора является новой композицией добавки и позволяет получить синергетический эффект предотвращения расслаиваемости бетонной смеси с высокой подвижностью. При этом указанная композиция оказывает пластифицирующее действие на бетонные смеси с разными значениями В/Ц. Наименьшее увеличение подвижности бетонной смеси выявлено при В/Ц=0,5. При введении композиционной добавки, включающей СДО в количестве 0,01% от массы цемента, осадка конуса увеличивается в среднем на 0,8 см относительно значений без нее. Расплыв конуса увеличивается в среднем на 2,2 см. Такое увеличение подвижности бетонной смеси не превышает доверительного интервала по плану эксперимента (±2,6 см при α=0,05) и принято как незначительное. Бетонная смесь с В/Ц=0,5 характеризуется большим содержанием портландцемента и большей вязкостью цементной пасты. Это служит сдерживающим фактором для кинетики вовлеченного воздуха и его разжижающего действия. Осадка конуса бетонных смесей с В/Ц=0,56 и 0,65 увеличивается в среднем на 1,8 и 3,6 см соответственно. Расплыв конуса увеличивается в среднем на 1,6 и 2,2 см, соответственно.

С увеличением дозировок добавки подвижность бетонной смеси возрастает. При введении СДО в количестве 0,05% от массы цемента и В/Ц=0,5; 0,56 и 0,65 осадка конуса увеличивается в среднем на 1,4 см (7%), 3 см (21,3%) и 5 см (44,1%). При введении СДО

Таблица 4

Table 4

Раствороотделение бетонных смесей с добавками СНФ+SiO₂ и СДО (% от массы цемента)
Mortar separation of concrete mixtures with additives of sulfonated naphthalene formaldehyde resins + SiO₂ and saponified wood resin (% by weight of cement)

СНФ+SiO ₂	В/Ц=0,5			В/Ц=0,56			В/Ц=0,65		
	СДО			СДО			СДО		
	0,01	0,05	0,07	0,01	0,05	0,07	0,01	0,05	0,07
0,2+0,1	3	2,5	1,5	1	1,5	1	2,5	2	2
0,4+0,1	2,5	2,5	1,5	1	1,5	1	2	2	2
0,6+0,1	3,5	3	2	2	2	1,5	3	2,5	2,5
0,8+0,1	3,5	3	2	2	2	1,5	3	2,5	2,5
1+0,1	4	4	3	3	3	2,5	3,5	3,5	3,5

в количестве 0,07% от массы цемента и В/Ц=0,5; 0,56 и 0,65 осадка конуса увеличивается в среднем на 2,2 см (12,2%), 4 см (28,4%) и 6,2 см (57,3%). Расплыв конуса бетонных смесей с указанными значениями В/Ц при СДО 0,05% увеличивается соответственно на 3 см (6,2%), 3,2 см (7,8%) и 4,6 см (8,9%). Расплыв конуса бетонных смесей с указанными значениями В/Ц при СДО 0,07% увеличивается соответственно на 3,8 см (7,8%), 4,4 см (10,4%) и 5,2 см (11,3%).

Повышение концентрации воздухововлекающего компонента до 0,05 и 0,07% от массы портландцемента приводит к увеличению подвижности бетонных смесей до уровня с большей плотностью цементной пасты. Это является положительным фактором, способствующим получения синергетического эффекта комплексной добавки. Наибольшее пластифицирующее влияние указанная композиция оказывает на бетонные смеси с относительно низким содержанием портландцемента. При высоком содержании портландцемента и низким В/Ц более вязкая цементная паста сдерживает пластифицирующее влияние вовлеченного воздуха. Вовлеченный воздух оказывает взвешивающее воздействие на крупный и мелкий заполнитель и за счет этого снижает риск их сегрегации при укладке бетонной смеси.

Результаты экспериментальной проверки риска сегрегации компонентов бетонной смеси представлены в табл. 4.

Выводы

В результате исследования установлено, что показатели, характеризующие сегрегацию компонентов, ниже критических значений. Расслаиваемость бетонных смесей не выявлена при внесении принятых композиций наномодифицированной добавки. Влияние воздухововлекающей добавки на расслаиваемость компонентов бетонной смеси объясняется эффектом взвешивающего воздействия. В процессе гидратации бетонная смесь приобретает структуру и гидравлические свойства густой жидкости. Консистенция бетонной смеси в значительной степени зависит от соотношения компонентов. Это об-

условливает ее изменение от жесткой до текучей с большой подвижностью. При этом пузырьки вовлеченного воздуха служат своеобразной подушкой торможения. В среде воздушных пузырьков крупный заполнитель перемещается медленнее. В процессе гидратации цемента жидкая цементная паста затвердевает, при этом формируются твердые гидраты. Показатель раствороотделения не превышает 4%, что соответствует нормативам.

Таким образом, наномодифицированная добавка, включающая СНФ+SiO₂ и СДО, позволяет обеспечить технологичность бетонной смеси.

В результате исследования авторами предложены следующие рекомендации:

- проектирование бетонных смесей с заданной подвижностью осуществлять с использованием математических моделей, связывающих показатели подвижности и количества наномодифицированного суперпластификатора;

- для получения бетонных смесей с заданными характеристиками подвижности целесообразно применять наномодифицированный суперпластификатор в количестве (% от массы портландцемента): СНФ+SiO₂=(0,2–1)+0,1);

- для снижения риска сегрегации компонентов бетонной смеси наномодифицированный суперпластификатор СНФ+SiO₂=(0,2–1)+0,1) дополнить смолой древесной омыленной (СДО) в дозировке (% от массы портландцемента): 0,01–0,07.

Заключение

В исследовании изучено влияния комплексной наномодифицированной добавки на снижение риска сегрегации компонентов бетонной смеси. В частности, выполнено лабораторное исследование влияния добавки, комплексная композиция компонентов которой ранее не применялась. Наномодифицированная добавка состоит из СНФ, СДО и nanoSiO₂. Экспоненциальное уравнение регрессии позволяет прогнозировать потребность СНФ в зависимости от требуемой подвижности бетонной смеси. Сделаны следующие выводы:

1. Комплексная добавка позволяет получать бетонные смеси класса С12/15 с заданной подвижностью и предотвращать явление сегрегации их компонентов.

2. Разработанные математические модели, связывающие дозировку наномодификатора с осадкой и расплывом нормального конуса, позволяют проектировать бетонные смеси с требуемой подвижностью.

Список литературы / References

1. Yang L., Yilmaz E., Li J., Liu H., Jiang H. Effect of superplasticizer type and dosage on fluidity and strength behavior of cemented tailings backfill with different solid contents. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 187, pp. 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.155>
2. Боруля Н.И., Краснова Т.А. Проблемы обеспечения сохранения свойств бетонных смесей во времени // *Технологии бетонов*. 2013. № 6 (83). С. 8–11.
2. Boroulya N.I., Krasnova T.A. Problems of maintaining the properties of concrete mixtures in time. *Tekhnologii betonov*. 2013. No. 6 (83), pp. 8–11. (In Russian).
3. Marchon D., Flatt R.J. 8 – Mechanisms of cement hydration. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. 2016, pp. 129–145. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>
4. Nkinamubanzi P.C., Mantellato S., Flatt R.J. 16 - Superplasticizers in practice. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. 2016, pp. 353–377. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00016-3>
5. Zhang Y., Kong X. Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types of superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 69, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.11.009Y>
6. Svintsov A.P., Shchesnyak E.L., Galishnikova V.V., Fedjuk R.S., Stashevskaya N.A. Effect of nano-modified additives on properties of concrete mixtures during winter season. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 237. 117527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117527>
7. Свинцов А.П., Николенко Ю.В., Патрахальцев Н.Н., Иванов В.Н. Совершенствование технологии бетонных работ в монолитном домостроении // *Строительные материалы*. 2012. № 1. С. 28–32.
7. Svintsov A.P., Nikolenko Y.V., Patrakhal'tsev N.N., Ivanov V.N. Improvement of technology of concrete works in monolithic housing construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 1, pp. 28–32. (In Russian).
8. Barabanshchikov G., Komarinskiy M.V. Influence of superplasticizer s-3 on the technological properties of concrete mixtures. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 941–944, pp. 780–785. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.780>
9. Yang L., Yilmaz E., Li J., Liu H., Jiang H. Effect of superplasticizer type and dosage on fluidity and strength behavior of cemented tailings backfill with different solid contents. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 187, pp. 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.155>
10. Tan H., Ma B., Li X., Jian S., Yang H. Effect of competitive adsorption between sodium tripolyphosphate and naphthalene superplasticizer on fluidity of cement paste. *Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2014. Vol. 29 (2), pp. 334–340. <https://doi.org/10.1007/s11595-014-0917-4>
11. Kong D., Du X., Wei S., Zhang H., Yang Y., Shah S.P. Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 37, pp. 707–715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.006>

А.А. АСКАДСКИЙ^{1, 2}, д-р хим. наук (andrey@ineos.ac.ru); С. ВАН³, аспирант (wssyzxxjyb@qq.com),
В.И. КОНДРАЩЕНКО³, д-р техн. наук (kondrashchenko@mail.ru);
Т.В. ЖДАНОВА¹, аспирант (Zhdanovatv@mgsu.ru),
Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, д-р физ.-мат. наук (Matseevich@mgsu.ru)

¹ Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

² Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28)

³ Московский государственный университет путей сообщения (127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

Прогнозирование модуля упругости композитов на основе смесей полимеров

Рассмотрены способы прогнозирования модуля упругости материалов на основе смесей совместимых и несовместимых полимеров. Эти материалы содержат тонкие дисперсии одного из полимеров в полимерной матрице другого полимера. Проанализированы варианты: дисперсия твердого аморфного полимера определенного химического строения в твердой аморфной матрице полимера другого химического строения; дисперсия частиц минерального наполнителя в матрице композита на основе смеси органических полимеров. Зависимости модулей упругости от мольной, весовой и объемной доли определяются ван-дер-ваальсовым объемом компонентов, молекулярной массой повторяющихся звеньев, плотностью компонентов. Построены зависимости модуля упругости смесей поливинилхлорида с рядом полимеров, включая ароматические полиэфиры, полиэфиркетоны, полисульфон, поликарбонат. Наибольшее увеличение модуля упругости от 2400 до 3980 МПа дает полипиромеллитимид анилинфталейна. Получение древесно-полимерных композитов увеличивает модуль упругости от 2400 до 4660 МПа в условиях растяжения. Введение минерального наполнителя в виде CaCO₃ приводит к увеличению модуля E до 3230 МПа при содержании CaCO₃ по отношению к древесному наполнителю 42%. Прогноз модуля упругости для композитов, содержащих тосо бамбук в качестве древесного наполнителя, показывает, что при таком содержании древесного наполнителя модуль упругости может возрасти до 4400 МПа.

Ключевые слова: совместимость полимеров, полимерные смеси, модуль упругости, ван-дер-ваальсов объем, древесно-полимерные композиты.

Для цитирования: Аскадский А.А., Ван С., Кондращенко В.И., Жданова Т.В., Матеевич Т.А. Прогнозирование модуля упругости композитов на основе смесей полимеров // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 60–66.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-60-66>

A.A. ASKADSKII^{1,2}, Doctor of Sciences (Chemistry) (andrey@ineos.ac.ru); C. WANG³, Graduate Student (wssyzxxjyb@qq.com);

V.I. KONDRASHCHENKO³, Doctor of Sciences (Engineering) (kondrashchenko@mail.ru); T.V. ZHDANOVA¹, Graduate Student (Zhdanovatv@mgsu.ru);

T.A. MATSEEVICH¹, Doctor of Sciences (Physics and Mathematic) (Matseevich@mgsu.ru)

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

² A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS)

(18, Vavilova Street, Moscow, 119991, Russian Federation)

³ Russian University of Transport (9, Obrazcova Street, Moscow, 127994, Russian Federation)

Forecasting the Elasticity Modulus of Composites Based on Polymer Blends

Methods for forecasting the elastic modulus of materials based on blends of compatible and incompatible polymers are considered. These materials contain fine dispersions of one of the polymers in the polymer matrix of the other polymer. The options are analyzed: dispersion of a solid amorphous polymer of a certain chemical structure in a solid amorphous polymer matrix of a different chemical structure; the dispersion of mineral filler particles in a composite matrix based on a mixture of organic polymers. The dependences of the elastic modulus on the molar, weight, and volume fractions are determined by the van der Waals volume of the components, the molecular mass of the repeating units, and the density of the components. The dependences of the elastic modulus of blends of polyvinyl chloride with a number of polymers, including aromatic polyesters, polyether ketones, polysulfone, polycarbonate, are constructed. The greatest increase in the elastic modulus from 2400 to 3980 MPa gives polypyrromellitimide anilinephthalin. The preparation of wood-polymer composites increases the elastic modulus from 2400 to 4660 MPa under tensile conditions. The introduction of a mineral filler in the form of CaCO₃ leads to an increase in the modulus E to 3230 MPa with a CaCO₃ content relative to the wood filler of 42%. The forecast of the elastic modulus for composites containing moso bamboo as a wood filler shows that with this content of wood filler, the elastic modulus can increase to 4400 MPa.

Keywords: compatibility of polymers, polymeric blends, modulus of elasticity, van-der-waals volume, wood-polymer composites.

For citation: Askadskii A.A., Wang C., Kondrashchenko V.I., Zhdanova T.V., Matseevich T.A. Forecasting the elasticity modulus of composites based on polymer blends. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 60–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-60-66>

Новые полимерные материалы разрабатываются, как правило, путем создания смесей известных полимеров. К настоящему времени изучены механические свойства (прочность, модуль упругости и др.) большого количества смесей полимеров, но лишь некоторые исследования связаны с расчетными методами прогнозирования. Кратко рассмотрим эти рабо-

ты. Для смесей полистирола и АБС-пластика установлено, что их механические свойства лучше, чем аналогичные свойства составляющих компонентов [1]. Авторы объясняют это хорошей совместимостью данных полимеров. В работе [2] рассмотрены различные расчетные методы оценки зависимостей модуля упругости от состава смесей. Эти зависимости

часто являются экстремальными и обладают максимумами, т. е. модули упругости смесей могут превосходить средние значения для различных составов.

Были исследованы морфология и свойства смесей полистирола с сополимером стирола и акрилонитрила. Измеренные модули упругости смесей сравнивали с расчетными значениями, которые описывали с помощью теории Дои [3]. Установлено, что основную роль играет увеличение размера частиц, связанное с изменением межфазного натяжения и вязкости смесей. Влияние межфазного натяжения в несовместимых смесях полимеров изучалось в ряде работ [4–8]. Большое внимание уделяется морфологии смесей, размерам частиц, попыткам приготовления тонкодисперсных смесей и влиянию всех этих факторов на модуль упругости и другие механические свойства [9–12].

Несмотря на наличие большого числа источников, посвященных структуре и механическим свойствам смесей, анализируемые в данной работе вопросы не всегда находят адекватное рассмотрение. Прежде всего это относится к возможности предсказания совместимости полимеров на основе их химического строения и фазового состояния, оценке модуля упругости смеси с учетом фазового и физического состояния смешиваемых полимеров (дисперсия твердого полимера в эластомере, дисперсия двух твердых, стеклообразных или кристаллических полимеров). При этом возможно химическое взаимодействие между микрофазами. Все это влияет на модуль упругости материалов на основе смесей полимеров. В данной статье рассмотрена дисперсия твердого полимера 1 в твердом полимере 2.

Для проведения анализа модуля упругости E смеси используем формулу, полученную в работе [13], и преобразуем ее:

$$E = \frac{\alpha_{m,p1} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} + \alpha_{m,p2} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2} + \dots + \alpha_{m,pn} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{pn}}{\frac{\alpha_{m,p1} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1}}{E_1} + \frac{\alpha_{m,p2} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2}}{E_2} + \dots + \frac{\alpha_{m,pn} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{pn}}{E_n}}. \quad (1)$$

В формуле (1) $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1}$, $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2}$, $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{pn}$ – ван-дер-ваальсовы объемы повторяющихся звеньев (или повторяющихся фрагментов сетки) полимеров 1, 2 и соответственно; α_{m1} , α_{m2} и α_{mn} – мольные доли полимеров 1, 2 и n соответственно; E_1 , E_2 и E_n – модули упругости полимеров 1, 2 и n соответственно.

В более компактной форме уравнение (1) записывается в виде:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}{\sum_{k=1}^{k=n} \frac{\alpha_k \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}{E_k}}, \quad (2)$$

где α_k – мольная доля k -го компонента; $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_k$ – ван-дер-ваальсов объем k -го компонента; E_k – модуль упругости k -го компонента.

Учитывая, что для двухкомпонентной системы $\alpha_{m1} + \alpha_{m2} = 1$, уравнение (2) записывается в виде:

$$E = \frac{1 + \alpha_{m2} \left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_2}{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_1} - 1 \right]}{\frac{1}{E_1} + \alpha_{m2} \left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_2}{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_1} \frac{E_2}{E_1} - 1 \right]}. \quad (3)$$

В уравнении (3) $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_1$ и $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_2$ – ван-дер-ваальсовы объемы повторяющихся звеньев (или повторяющихся фрагментов сетки) полимеров 1 и 2 соответственно; α_{m1} и α_{m2} – мольные доли полимеров 1 и 2 соответственно; E_1 и E_2 – модули упругости полимеров 1 и 2 соответственно.

Для того чтобы получить зависимость модуля упругости от весовой доли полимеров α_w , используем связь между мольной и весовой долями:

$$\alpha_{m2} = \frac{1}{1 + \frac{M_{p2}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{w2}} - 1 \right)}. \quad (4)$$

Тогда зависимость модуля упругости от весовой доли второго полимера α_{w2} запишется в виде

$$E = \frac{1 + \left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} - 1}{1 + \frac{M_{p2}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{w2}} - 1 \right)} \right]}{\frac{1}{E_1} + \left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} - 1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right] \frac{M_{p2}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{w2}} - 1 \right)}. \quad (5)$$

Проведем оценку зависимости модуля упругости от мольной доли второго полимера, вводимого в смесь с поливинилхлоридом (ПВХ). Оценка сделана по уравнению (3), куда входит ряд физических параметров, представленных в табл. 1 для полимеров разных классов, которые, по данным работы [14], являются совместимыми с поливинилхлоридом. Поскольку тема статьи – прогнозирование модулей упругости для смесей полимеров, оценим все физические параметры полимеров расчетным путем. Модуль упругости при растяжении рассчитывается методом Дж. Бицерано [15] с помощью компьютерной программы DTW PDtools. Ван-дер-ваальсов объем $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_i$ и плотность ρ полимеров рассчитываются с помощью компьютерной программы «Каскад» (ИНЭОС РАН).

Полученные зависимости модуля упругости от мольной доли второго полимера показаны на рис. 1.

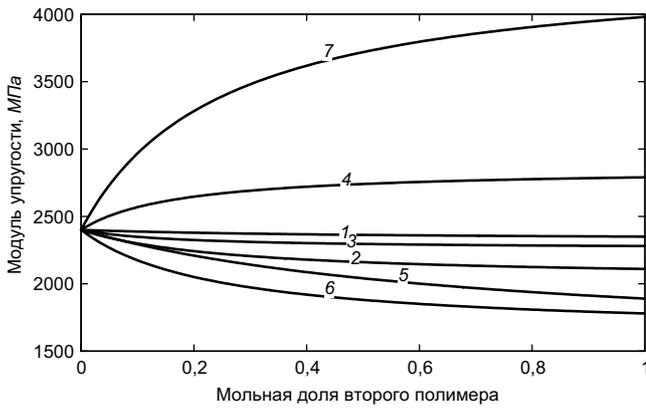


Рис. 1. Зависимость модуля упругости от мольной доли второго полимера; номера кривых соответствуют номерам полимеров в табл. 1
Fig. 1. The modulus of elasticity depends on the mole fraction of the second polymer. The curve numbers correspond to the polymer numbers in Table 1

Ряд полимеров (№ 1, 2, 3, 5, 6) снижают модуль упругости поливинилхлорида при введении их в состав смеси. Другие полимеры (№ 4, 7) повышают модуль упругости, причем при сравнительно небольших концентрациях модуль упругости быстро растет с увеличением концентрации добавляемого полимера, а затем возрастание замедляется.

Проанализируем зависимость E от объемной доли полимера 2. Молярная доля связана с объемной долей следующим соотношением:

$$\alpha_{m2} = \frac{1}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}, \quad (6)$$

где M_{p1} и M_{p2} – молекулярные массы повторяющихся звеньев полимеров 1 и 2 соответственно; ρ_{p1} и ρ_{p2} – их плотности; β_2 – объемная доля полимера 2.

Подстановка (6) в (3) позволяет провести описание зависимости модуля упругости от объемной доли полимера 2:

$$E = \frac{1 + \frac{\left[\left(\frac{\sum \Delta V_i}{i} \right)_{p2} / \left(\frac{\sum \Delta V_i}{i} \right)_{p1} - 1 \right]}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}}{\frac{\left[\left(\frac{\sum \Delta V_i}{i} \right)_{p2} / \left(\frac{\sum \Delta V_i}{i} \right)_{p1} - \frac{1}{E_2} \right]}{\frac{1}{E_1} + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}}. \quad (7)$$

Зависимость E от объемной доли β_2 второго полимера (согласно табл. 1) представлена на рис. 2. Качественно эта зависимость такая же, как и зависимость модуля упругости от мольной доли второго полимера. На рис. 2 видно, что модуль упругости может повыситься на сравнительно небольшую ве-

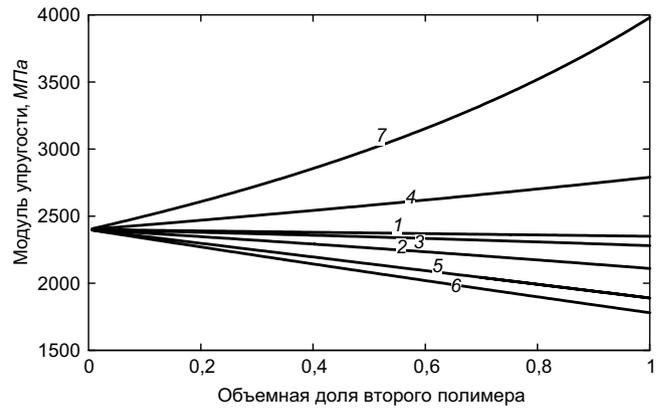


Рис. 2. Зависимости модуля упругости от объемной доли второго полимера; номера кривых соответствуют номерам полимеров в табл. 1
Fig. 2. The modulus of elasticity depends on the volume fraction of the second polymer. The curve numbers correspond to the polymer numbers in Table 1

личину, но в большинстве случаев он снижается при введении в смесь второго полимера.

Проанализируем зависимость модуля упругости от содержания природного полимера – древесины. Древесина вводится в технологическую смесь с ПВХ, в результате чего модуль упругости существенно возрастает. Для расчета модуля упругости необходимо знать состав древесины разных пород и физические параметры ПВХ и компонентов древесины. Эти параметры заимствованы из литературных источников [16–18] и приведены в табл. 2 и 3.

Молекулярная масса древесины, которая является вторым полимером, вводимым в смесь с ПВХ, рассчитывалась по формуле:

$$M_2 = \alpha_{ц} \cdot M_{ц} + \alpha_{л} \cdot M_{л} + \alpha_{гц} \cdot M_{гц}, \quad (8)$$

где $\alpha_{ц}$, $\alpha_{л}$ и $\alpha_{гц}$ – доли целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз соответственно; $M_{ц}$, $M_{л}$ и $M_{гц}$ – молекулярные массы целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз соответственно.

Величины молекулярной массы лигнина и гемицеллюлозы взяты в расчет как средние значения. Например, для гемицеллюлозы среднее значение рассчитывалось на основе значения молекулярной массы для 16 гемицеллюлоз различного химического строения. Эти данные приведены в монографии [16].

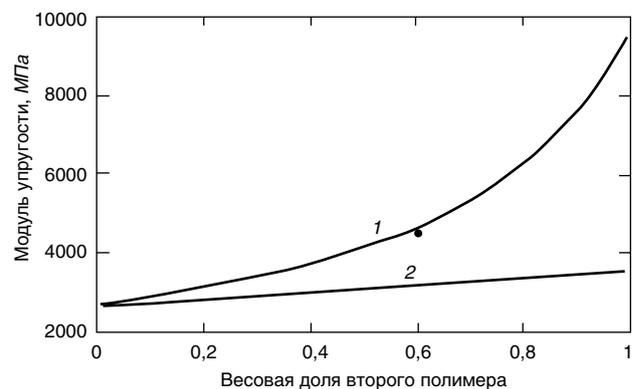


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от весовой доли второго полимера: 1 – древесина хвойных пород; 2 – древесина мосо бамбука
Fig. 3. The modulus of elasticity depends on the weight fraction of the second polymer: 1 – softwood; 2 – moso bamboo wood

Таблица 1
Table 1Модули упругости ряда полимеров
Elastic modulus of a number of polymers

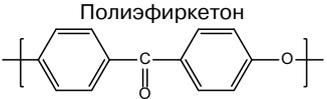
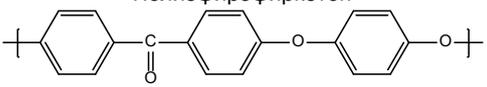
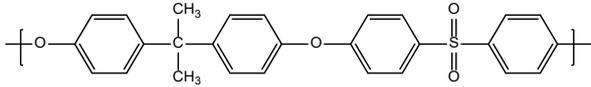
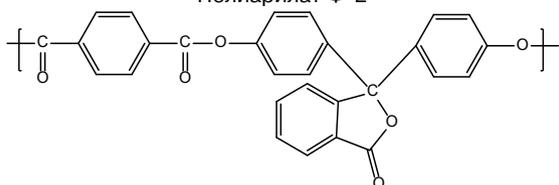
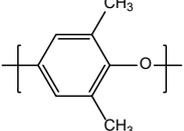
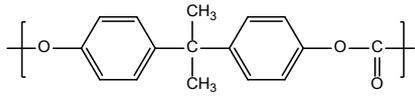
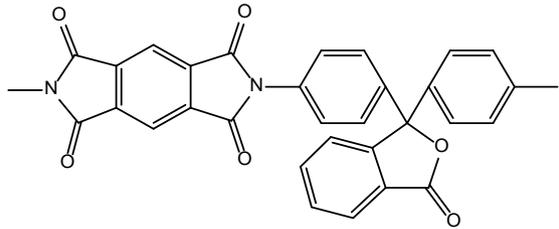
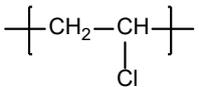
№ п/п	Полимер	Модуль упругости E, МПа	Ван-дер-ваальсов объем, $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2, \text{Å}^3$	$\frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2}{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1}$	$\frac{M_{p2} \cdot \rho_{p1}}{M_{p1} \cdot \rho_{p2}}$
1	Полиэфиркетон 	2350	178	3,574	3,613
2	Полиэфирэфиркетон 	2110	205	4,192	5,351
3	Полисульфон 	2280	312	6,38	8,165
4	Полиарилат Ф-2 	2790	390	7,975	7,94
5	Поли-2,6-диметилфениленоксид 	1890	92	1,881	2,383
6	Поликарбонат 	1780	187	3,824	4,877
7	Полипиромеллитимид анилинфталейна 	3980	409	8,364	8,314
8	Поливинилхлорид 	2400	48,9	1	

Таблица 2

Table 2

Основной состав древесины, % [16–18]
Main composition of wood, % [16–18]

Древесина	Целлюлоза	Лигнин	Гемицеллюлоза
Хвойные породы	42,5	28,5	22,5
Moso бамбук	44,6	20,3	23,6

Таблица 3

Table 3

Физические параметры основных компонентов
древесины хвойных пород [16–18]
Physical parameters of the main components
softwood [16–18]

Компоненты древесины	Молекулярная масса повторяюще- гося звена	Ван-дер- ваальсов объем, Å ³	Плотность, г/см ³
Целлюлоза	162	102,6	1,54
Лигнин	340	302	1,23
Гемицеллюлозы	292	203	1,4

Аналогичным образом рассчитывали ван-дер-ваальсовы объемы древесины:

$$\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2 = \alpha_{Ц} \cdot \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{Ц} + \alpha_{Л} \cdot \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{Л} + \alpha_{ГЦ} \cdot \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{ГЦ}, \quad (9)$$

где $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{Ц}$, $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{Л}$ и $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{ГЦ}$ — ван-дер-ваальсовы объемы целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы соответственно.

При использовании значений всех параметров в табл. 2 и 3 с помощью уравнения (5) получена зависимость модуля упругости от весовой доли древесины хвойных пород и moso бамбука (рис. 3).

На рис. 3 показаны модули упругости, измеренные при растяжении композитов ПВХ с древесиной. Модуль упругости композита с древесиной хвойных пород существенно возрастает с увеличением концентрации древесины. При соотношении ПВХ и древесины 40:60, которое применяется при изготовлении композитов в одной из отечественных компаний, модуль упругости при растяжении возрастает от 2400 до 4660 МПа. Это отражено точкой на кривой 1 на графике. Как видно из графика, экспериментально измеренный модуль упругости хорошо совпадает с расчетным модулем. При введении в ПВХ moso бамбука модуль упругости при растяжении также возрастает, но не столь значительно по сравнению с модулем упругости при введении древесины хвойных пород. Этот вывод нуждается в экспериментальном подтверждении.

Теперь проанализируем зависимость модуля упругости композитов, в которых часть древесной муки заменена на минеральный наполнитель CaCO₃. Уравнение (5) позволяет рассчитывать зависимости модуля упругости от весовой доли наполнителя. Для этого сначала нужно определить величину плотности ρ_n полимерного связующего. Расчет проводится по формуле:

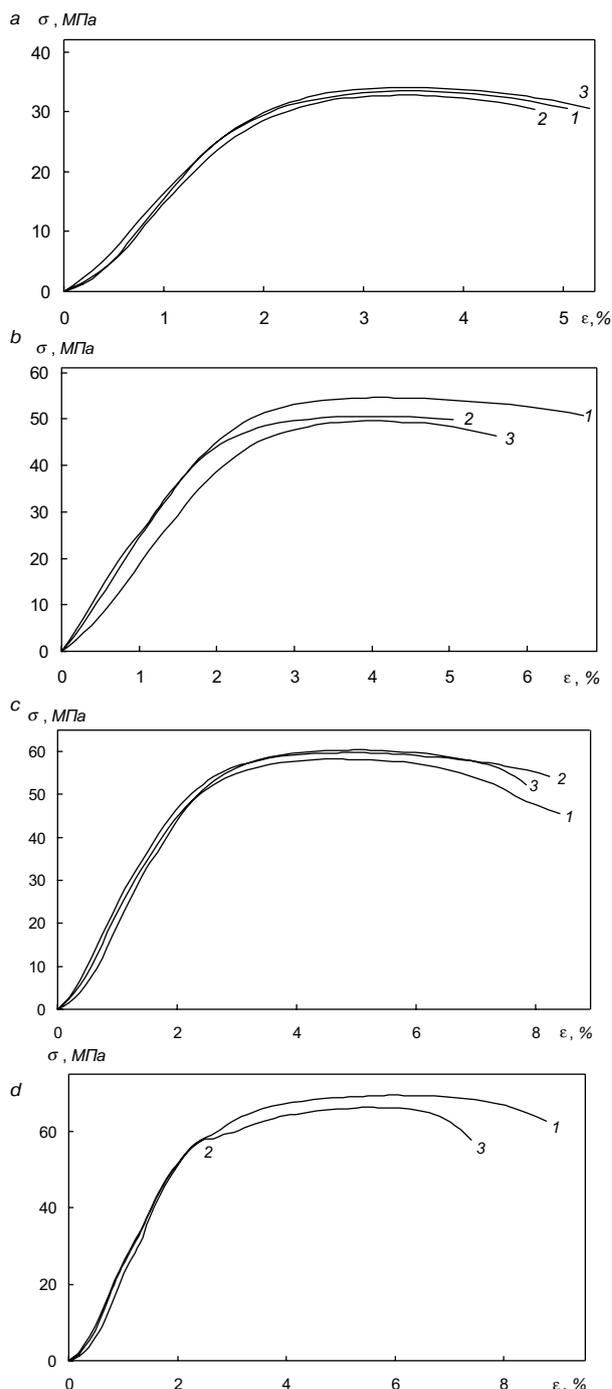


Рис. 4. Кривые сжатия образцов композитов, содержащих полимерное связующее и минеральный наполнитель. Содержание CaCO₃ равно 0% (а); 30% (b); 40% (c) и 60% (d) по отношению к древесной муке.
Fig. 4. Stress-strain curves at compression of composite samples containing polymer binder and mineral filler. The CaCO₃ content is 0% (a); 30% (b); 40% (c) and 60% (d) with respect to wood flour

$$\rho_n = (\alpha_{Ц} \cdot \rho_{Ц} + \alpha_{Л} \cdot \rho_{Л} + \alpha_{ГЦ} \cdot \rho_{ГЦ}) \cdot 0,6 + \rho_{ПВХ} \cdot 0,4, \quad (10)$$

где $\alpha_{Ц}$, $\alpha_{Л}$ и $\alpha_{ГЦ}$ — доли целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз соответственно; $\rho_{Ц}$, $\rho_{Л}$, $\rho_{ГЦ}$ и $\rho_{ПВХ}$ — молекулярные массы целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы и поливинилхлорида соответственно.

Значения плотности ρ и весовых долей компонентов древесины приведены в табл. 2 и 3. Использовалось связующее, содержащее 40% ПВХ и 60%

Таблица 4
Table 4Модули упругости образцов при сжатии
Elastic modulus of samples at compression

Образец	Доля CaCO ₃ , %	Усредненный модуль упругости, МПа
а	0	1930
б	30	2660
в	40	2900
г	60	3230
CaCO ₃	100	6500

древесной муки. Модули упругости были определены из кривых сжатия, измеренных для всех образцов, содержащих разное количество CaCO₃. Были проведены параллельные измерения для трех образцов каждой серии. Измерения проведены на приборе для микромеханических испытаний конструкции Дубова–Регеля, модифицированного нами с целью преобразования показаний фотоэлектрооптического динамометра в электрический сигнал, которые регистрируются с помощью гальванометра. Все данные автоматически записываются на компьютере, в том числе и результаты измерений и расчетов. Использовались образцы размером 4×4×6 мм с плоскопараллельными гранями. Скорость сжатия составляла 0,187 мм/мин. Кривые сжатия показаны на рис. 4.

Прогноз модуля упругости был сделан для двухкомпонентной системы. Первый компонент – это древесно-полимерный композит, содержащий ПВХ и древесную муку, полученную из хвойных пород или из тосо бамбука. Второй компонент – CaCO₃. Поскольку этот компонент не является органическим веществом, его ван-дер-ваальсов объем не может быть рассчитан с помощью компьютерной программы «Каскад». Поэтому эффективный ван-дер-

ваальсов объем $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2$ можно рассчитать по уравнению (5), используя экспериментальное значение модуля E_2 для композита, содержащего наибольшее количество CaCO₃, равное 70% по отношению к древесной муке. Поскольку концентрация древесной муки в композите составляет 60%, концентрация CaCO₃ составляет $70 \times 0,6 = 42\%$. Уравнение, которое необходимо использовать, вытекает из формулы (5):

$$E = E_{p1} \frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p1} \cdot \frac{M_{CaCO_3}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{wCaCO_3}} - 1\right) - \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{CaCO_3}}{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p1} \cdot \frac{M_{CaCO_3}}{M_{p1}} \left(\frac{1}{\alpha_{wCaCO_3}} - 1\right) + \frac{E_1}{E_2} \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{CaCO_3} - \left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p1}}. \quad (11)$$

Индекс $p1$ означает, что все расчетные величины относятся к полимерному связующему, состоящему из ПВХ и древесины. Молекулярные массы компонентов древесины и их весовые доли представлены в табл. 2 и 3, а модуль упругости E_1 для древесно-полимерного композита, не содержащего минеральный наполнитель, равен 1930 МПа. Средний модуль упругости E_2 CaCO₃ равен 6500 МПа. Экспериментальная величина модуля упругости рассматриваемого композита $E=3230$ МПа. Подстановка

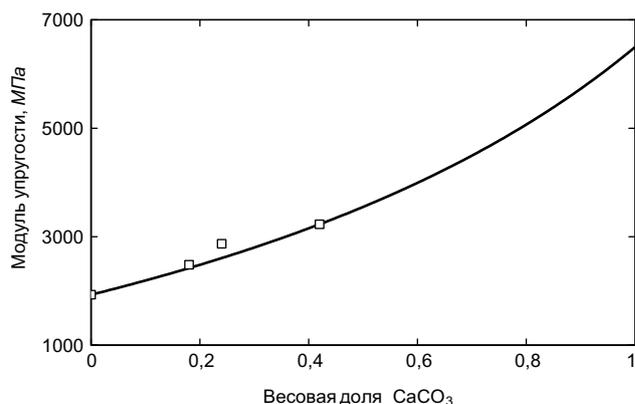


Рис. 5. Зависимость модуля упругости от весовой доли CaCO₃ по отношению к древесному наполнителю; кривая – расчетная; точки – экспериментальные

Fig. 5. Dependence of the modulus of elasticity on weight fraction of CaCO₃ with respect to wood filler. Curve – calculated, points – experimental

всех значений параметров в уравнение (11) приводит к значению $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{CaCO_3} = 140 \text{ \AA}^3$. Используя это значение, можно рассчитать модуль упругости по уравнению (5) для всех концентраций минерального наполнителя и сравнить с экспериментальными данными. В результате получается зависимость модуля упругости от концентрации CaCO₃, показанная на рис. 5.

Из табл. 4 и рис. 5 видно, что модуль упругости при сжатии возрастает при увеличении концентрации минерального наполнителя. Одновременно можно заключить, что экспериментальные значения модулей упругости совпадают с расчетными значениями.

Проведем такие же расчеты для ДПК, содержащих в качестве матричного полимера смесь ПВХ с тосо бамбуком. Расчеты проведены по формулам (8), (9) и (10). Результаты расчетов следующие. Молекулярная масса

смеси $M_{p1} = 210$; ван-дер-ваальсов объем $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p1} = 155 \text{ \AA}^3$.

Подстановка этих параметров в уравнение (11) приводит к зависимости модуля упругости от весовой доли CaCO₃, показанной на рис. 6.

Сравнение рис. 5 и 6 показывает, что модуль упругости при любом содержании тосо бамбука выше модуля упругости композитов, содержащих древесную муку

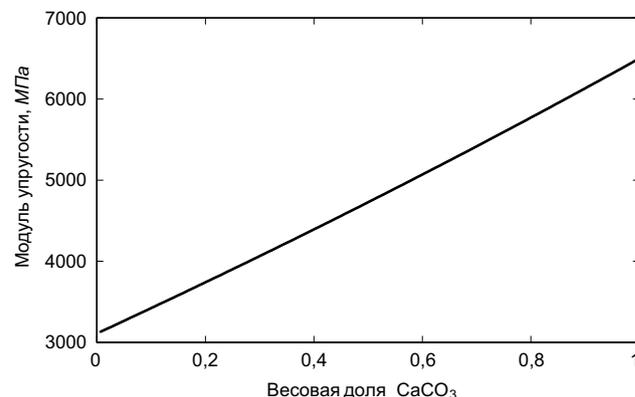


Рис. 6. Зависимость модуля упругости от весовой доли CaCO₃ по отношению к древесному наполнителю – тосо бамбуку

Fig. 6. The dependence of the modulus of elasticity on the weight fraction of CaCO₃ in relation to the wood filler is moso bamboo

хвойных пород. Однако при анализе этих зависимостей для композитов, содержащих древесную муку хвойных пород, использовали экспериментальные значения модуля упругости E_{p1} , а для композитов, содержащих moso бамбук, – только расчетное значение $E_{p1} = 3110$ МПа. В дальнейшем следует провести эксперименты по измерению кривых сжатия для таких композитов и сравнить результаты экспериментов и расчетов.

Заключение

Возможность расчета модулей упругости материалов на основе смесей полимеров продемонстрирована на примере дисперсии твердого полимера 1 в твердом полимере 2, а также на примере дисперсии минерального наполнителя в твердой полимерной матрице.

Список литературы / References

- Buthaina A. Ibrahim & Karrer M. Kadum. Influence of polymer blending on mechanical and thermal properties. *Modern Applied Science*. 2010. Vol. 4. No. 9, pp. 157–161.
- Saxe P., Freeman C., Rigby D. Mechanical properties of glassy polymer blends and thermosets. Materials Design, Inc., Angel Fire, NM and San Diego, CA. LAMMPS Users' Workshop and Symposium, Albuquerque, NM, August 8, 2013.
- Doi M., Ohta T.J. Dynamics and rheology of complex interfaces. *The Journal of Chemical Physics*. 1991. Vol. 95, pp. 1242–1248.
- Anastasiadis S.H., Gancarz I., Koberstein J.T. Interfacial tension of immiscible polymer blends: temperature and molecular weight dependence. *Macromolecules*. 1988. Vol. 21 (10), pp. 2980–2987.
- Biresaw G., Carriere C., Sammler R. Effect of temperature and molecular weight on the interfacial tension of PS PDMS blends. *Rheologica Acta*. 2003. Vol. 42. No. 1–2, pp. 142–147.
- Ellingson P. C., Strand D.A., Cohen A., Sammler R.L., Carriere C.J. Molecular weight dependence of polystyrene/Poly(Methyl Methacrylate) interfacial tension probed by imbedded-fiber retraction. *Macromolecules*. 1994. Vol. 27. No. 6, pp. 1643–1647.
- Gramespacher H., Meissner J. J. Interfacial tension between polymer melts measured by shear oscillations of their blends. *Journal of Rheology*. 1992. Vol. 36. No. 6, pp. 1127–1141.
- Lacroix C., Bousmina M., Carreau P.J., Favis B.D., Michel A. Properties of PETG/EVA Blends: 1. Viscoelastic, Morphological and Interfacial Properties. *Polymer*. 1996. Vol. 37. No. 14, pp. 2939–2947.
- Li R., Yu W., Zhou C.J. Rheological characterization of droplet-matrix versus co-continuous morphology. *Journal of Macromolecular Science. Sci. Series B. Physics*. 2006. Vol. 45. No. 5, pp. 889–898.
- Chopra D., Kontopoulou M., Vlassopoulos D., Hatzikiriakos S.G. Effect of maleic anhydride content on the rheology and phase behavior of poly(styrene-co-maleic anhydride)/poly(methyl methacrylate) blends. *Rheologica Acta*. 2001. Vol. 41, pp. 10–24.
- Guenther G.K., Baird D.G. An evaluation of the Doi-Ohta theory for an immiscible polymer blend. *Journal of Rheology*. 1996. Vol. 40. No. 1, pp. 1–20.
- Hashimoto T., Takenaka M., Jinnai H. Scattering studies of self-assembling processes of polymer blends in spinodal decomposition. *Journal of Applied Crystallography*. 1991. Vol. 24, pp. 457–466.
- Аскадский А.А., Попова М.Н., Кондращенко В.И. Физико-химия полимерных материалов и методы их исследования. М.: АСВ, 2015, 407 с.
- Askadskiy A.A., Popova M.N., Kondrashchenko V.I. Fiziko-khimiya polimernykh materialov i metody ikh issledovaniya. [Physical chemistry of polymer materials and methods for their research]. Moscow: ASV Publishing House. 2015. 407 p.
- Аскадский А.А., Ван С., Курская Е.А., Кондращенко В.И., Жданова Т.В., Матеевич Т.А. Возможности предсказания коэффициента термического расширения материалов на основе поливинилхлорида // *Строительные материалы*. 2019. № 11. С. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-57-65>
- Askadskiy A.A., Wang C., Kurskaya E.A., Kondrashchenko V.I., Zhdanova T.V., Matseevich T.A. Possibilities for predicting the coefficient of thermal expansion of materials based on polyvinyl chloride. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 11, pp. 57–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-57-65>
- Bicerano J. Prediction of polymer properties. New-York, Marcel Dekker, Inc., 1996. 669 p.
- Болобова А.В., Аскадский А.А., Кондращенко В.И., Рабинович М.Л. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. Ферменты, модели, процессы. М.: Наука, 2002. 343 с.
- Bolobova A.V., Askadskii A.A., Kondrashchenko V.I., Rabinovich M.L. Teoreticheskie osnovy biotekhnologii drevesnykh kompozitov. Fermenty, modeli, protsessy. [Theoretical foundations of biotechnology of wood composites. Enzymes, models, processes]. Moscow: Nauka. 2002. 343 p.
- Azeez M.A., Orege J.I. Bamboo, its chemical modification and products [J]. *Bamboo: Current and Future Prospects*, 2018: 25.
- Li X. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. 2004. LSU Master's Theses. 866 p.

УДК 692.33

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-67-75>

М.К. ИЩУК, канд. техн. наук (kamkon@yandex.ru)

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК), АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

Влияние различных факторов на оценку прочности кладки при сжатии (к вопросу совершенствования норм по каменным конструкциям)

Обоснована необходимость корректировки нормативных документов по каменной кладке ввиду несогласованности между собой ряда ГОСТов на испытание кирпича на сжатие, а также с СП 15.1330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции». Показано, что одна из проблем возникла в связи с изменением способа подготовки поверхности образцов для испытания керамического кирпича пластического формования на сжатие в ГОСТ 530-2012, где основным способом выравнивания поверхности стало шлифование взамен принятого ранее способа выравнивания раствором. Это привело к искусственному завышению марки кирпича. Для сохранения взаимосвязи ГОСТов и СП оптимальным является введение в ГОСТ 530 коэффициентов перехода от прочности шлифованного кирпича к прочности кирпича с выровненной раствором поверхностью. Также выявлены несогласованность методов испытания кирпичной кладки с СП 15.1330.2012 и ряд других проблем. Отмечено, что отдельные заимствования из европейских норм необходимы в связи с большим количеством пришедших из-за рубежа современных материалов и технологий. Вместе с тем в работе показано, что механическое внесение отдельных фрагментов из других норм нарушает целостность сложившейся системы нормативных документов.

Ключевые слова: каменная кладка, испытание кирпича на сжатие, марка по прочности, способ выравнивания поверхности образцов, шлифование, выравнивание раствором, коэффициент перехода, испытание кладки на сжатие, формула Онищика.

Для цитирования: Ищук М.К. Влияние различных факторов на оценку прочности кладки при сжатии (к вопросу совершенствования норм по каменным конструкциям) // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 67–75.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-67-75>

М.К. ИЩУК, Candidate of Sciences (Engineering) (kamkon@yandex.ru)

Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko (TSNIISK) JSC Research Center of Construction (6, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Influence of Different Factors on the Assessment of Strength of Masonry at Compression (to the question of improvement of norms on masonry constructions)

The article shows the need to adjust the normative documents on masonry due to the inconsistency of a number of GOSTs for compression testing of bricks with each other, as well as with SP 15.1330.2012 "Masonry and reinforced masonry structures". One of the problems arose in connection with a change in the method of preparing the surface of samples for testing ceramic bricks of plastic molding for compression in GOST 530-2012, where grinding became the main way to level the surface instead of the previously adopted solution leveling method. This led to an artificial overestimation of the brick compressive strength grade. To maintain the relationship between GOSTs and SP, it is optimal to introduce in GOST 530 transition factors from the strength of polished bricks to the strength of bricks with a solution leveling surface. There is an inconsistency in the methods of testing masonry with SP 15.1330.2012 and a number of other problems. Separate borrowings from European standards are inevitable due to the large number of modern materials and technologies that came from abroad. At the same time, the work shows that the mechanical introduction of individual fragments from other norms violates the integrity of the existing system of regulatory documents.

Keywords: masonry, compression test of bricks, strength grade, method for leveling the surface of samples, grinding, leveling with mortar, transfer coefficients, compression test of masonry, Onishchik's formula.

For citation: Ishchuk M.K. Influence of different factors on the assessment of strength of masonry at compression (to the question of improvement of norms on masonry constructions). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 7, pp. 67–75. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-67-75>

Введение

Основоположником науки по каменным конструкциям в СССР по праву считается Л.И. Онищик, который в середине 1930-х гг. на основе обобщения российского и зарубежного опыта и большого количества исследований возглавляемой им лабораторией разработал эмпирическую теорию работы каменной кладки. В основе и современных методов определения прочности кладки при одноосном сжатии лежит формула Л.И. Онищика [1]. Практически все исследования прочности кладки из новых материалов сводятся к установлению эмпирических коэффициентов в этой формуле.

Л.И. Онищиком и его учениками была создана взаимосвязанная система нормативных документов, охватывающая как методы испытания кирпича (камень), раствора для кладки, так и назначения прочностных характеристик кладки из них и методов расчета на различные воздействия. Большинство экспериментальных исследований кладки проводилось в ЦНИИСК (ранее ЦНИПС) по единой методике. При этом всегда учитывалось качество кладки при назначении сопротивления сжатию и другим воздействиям. Огромный вклад по исследованию кладки при длительном сжатии внес С.В. Поляков [2].

Приведенные в СП 15.1333 [3] таблицы сопротивления сжатию кладки из различных материалов получены на основе формулы Л.И. Онищика. Эти таблицы и коэффициенты условий работы к ним уточняются по мере появления новых материалов.

Прочность кладки при одноосном сжатии является важнейшим параметром и для расчетов стен при плоском напряженном состоянии. Этот параметр входит в большинство критериев прочности, в частности Г.А. Гениева [4], А.В. Пейджа [5 и др.]. Вместе с тем рассмотрение вопросов прочности кладки при плоском напряженном состоянии выходит за рамки настоящей статьи.

Формула Л.И. Онищика для одноосного сжатия

Взаимосвязь между прочностными характеристиками кирпича (камня) и раствора с прочностью кладки при осевом сжатии определяется эмпирической формулой Л.И. Онищика [1]:

$$R_u = AR_1 \left(1 - \frac{a}{b + 1/2 R_2 / R_1} \right) \gamma, \quad (1)$$

где R_u – предел прочности кладки при сжатии; R_1 – предел прочности камня при сжатии; R_2 – предел прочности раствора при сжатии; γ – понижающий коэффициент для растворов марок М25 и ниже; A – конструктивный коэффициент, характеризующий степень использования в кладке прочности камня, принимаемый наименьшим из полученных по формулам:

$$A = \min \left\{ \frac{100 + R_1}{100m + nR_1} < 1, \quad (2a)$$

$$\frac{1,2}{1 + R_1 / 3R_{u,b}} < 1, \quad (2b)$$

$$\frac{2,2}{1 + R_1 / R_{u,sh}} < 1, \quad (2в)$$

где $R_{u,b}$ – предел прочности кирпича при изгибе; $R_{u,sh}$ – предел прочности кирпича при срезе.

Коэффициенты a, b, m, n в формулах (1) и (2) зависят от вида камня. Коэффициент A значительно

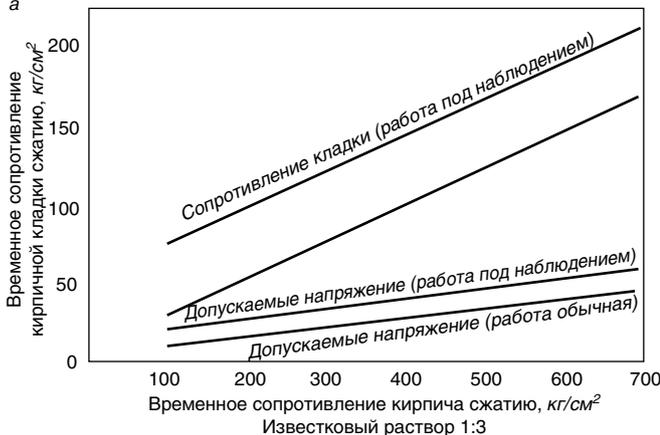


Рис. 3. Влияние качества кладки на ее прочность при сжатии [7]: а – при кладке на известковом растворе состава 1:1:6

Fig. 3. Influence of the quality of masonry on its compressive strength [7]: a – when laying on a lime mortar of the composition 1:1:6

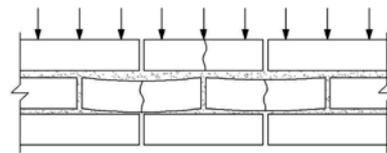


Рис. 1. Изгиб и срез кирпича вследствие неровности растворной постели
Fig. 1. Bend and cut of the brick due to the unevenness of the mortar bed

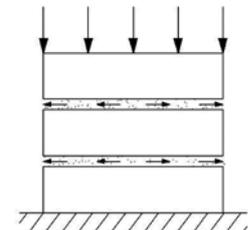


Рис. 2. Растяжение кирпича раствором вследствие его поперечного расширения при сжатии
Fig. 2. Tension of a brick with a solution due to its transverse expansion during compression

меньше 1, что говорит о неполном использовании прочности кирпича при сжатии при работе в составе кладки. Его разрушение происходит не столько от раздробления при сжатии, сколько от изгиба и среза (рис. 1) [6].

В случае, когда коэффициент поперечного расширения у раствора выше, чем у кирпича, тому же способствуют возникающие вследствие поперечного расширения раствора горизонтальные растягивающие напряжения (рис. 2) [6].

Следует отметить, что до относительно недавнего времени большинство образцов кладки для испытаний выкладывалось квалифицированными каменщиками. Было установлено, что при выполнении кладки каменщиком с низкой квалификацией ее прочность может оказаться до полутора раз ниже, чем кладка квалифицированного каменщика.

Влияние качества кладки на ее прочность при сжатии исследовалось еще в начале прошлого века в США. В работе американского исследователя Л.Б. Лента в переводе Л.И. Онищика [7] показано, что прочность кладки улучшенного качества (выполненной под наблюдением) в образцах в виде кирпичных стен выше в 2,2 раза для кладки обычного качества на пластичных известковых растворах состава 1:3, в 2,2 раза выше для кладки на цементно-известковых растворах состава 1:1:6 (рис. 3) и в 1,5 раза – на цементных растворах.

В пояснительной записке к материалам для урочного положения (предшественника СНиП), разрабатываемым в 1949 г. [8], Л.И. Онищик писал: «В таблицах нормативных сопротивлений кладки принято значение $K_{рука\ каменщ} = 1$. Для малоквалифицирован-





Рис. 4. Испытание кладки обычного и плохого качества на местное сжатие [9]: a, b, c, d – изготовление столба с имитацией ремонта с вычинкой; e – образец во время испытаний на местное сжатие
Fig. 4. Test of normal and poor quality masonry for local compression [9]: a, b, c, d – making a pillar with an imitation of repair with a wedge; e – sample during local compression tests

ных каменщиков, прошедших только краткосрочную подготовку, коэффициент $K_{рука\ каменщ} = 0,9$. Это значение следует считать наиболее вероятным в современных условиях. Более низкое значение (для чернорабочего $K_{рука\ каменщ} = 0,8$) должно учитываться в случае производства работ специальным контингентом неквалифицированной рабочей силы».

Сравнение прочности кладки, выполненной в формах с вибрацией, т. е. при очень хорошем заполнении всех швов, показывает превышение ее прочности по сравнению с обычной в 1,5 раза в соответствии с [3].

Аналогичные результаты были получены нами при испытании кладки низкого и обычного качества на местное сжатие (рис. 4) [9]. Эталонные образцы выкладывались каменщиком средней квалификации. Им же выкладывались столбы, имитирующие ремонт кладки с так называемой вычинкой. Прочность эталонных образцов оказалась выше, чем образцов кладки с вычинкой, в 1,7 раза.

До Л.И. Онищика некоторые исследователи считали вообще невозможным определять прочность кладки по единой формуле для разных материалов вследствие большого разброса прочностных показателей в зависимости от качества кладки. Так, в работе [10] А.П. Моляво-Высоцкий пишет, что «...возможность создания формул, позволяющих предсказывать прочность кладки, – сомнительна... Мы сталкиваемся со многими факторами, играющими огромную роль в прочности кладки, показатели которых не поддаются математическому выражению и влияние которых поглощает влияние других факторов, в функции которых выводятся эмпирические формулы».

С.А. Семеновым [11, 12] было предложено коэффициент $K_{рука\ каменщ}$ подставлять в формулу (1), после чего она приобретает вид:

$$R_u = K_{рука\ каменщ} AR_1 \left(1 - \frac{a}{b + 1/2R_2/R_1} \right) \gamma. \quad (3)$$

При испытании кладки из новых материалов выполнялись эталонные образцы из уже известных материалов. По испытаниям эталонных определялся коэффициент $K_{рука\ каменщ}$. При назначении расчетных сопротивлений кладки сжатию результаты принима-

лись при $K_{рука\ каменщ} = 1$, т. е. в большинстве случаев в 1,3–1,5 раза ниже полученных при испытаниях. В нормах расчетное сопротивление кладки сжатию R определяется по формуле:

$$R = 2 \times K_{рука\ каменщ} R_u, \quad (4)$$

где R_u – предел прочности кладки при сжатии, определяемый по формуле (1) в предположении, что кладка выполнена каменщиком с низкой квалификацией, т. е. при $K_{рука\ каменщ} = 1$.

К сожалению, со временем многими исследователями, особенно при испытаниях вне ЦНИИСК, это уже не учитывается, что порой приводит к неверному трактованию экспериментальных данных. С целью устранения этого противоречия целесообразно в новую редакцию ГОСТ 32047–2012 на испытание кладки на сжатие [13] ввести понятие коэффициента $K_{рука\ каменщ}$ и учитывать его при назначении временного сопротивления кладки сжатию.

Взаимосвязь методов испытания кирпича и раствора с прочностью кладки в формуле Л.И. Онищика

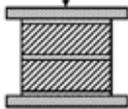
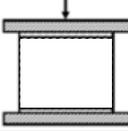
Величины входящих в формулу (1) прочности кирпича (камня) R_1 и раствора R_2 являются во многом условными и зависят от метода испытания. С изменением методов испытаний корректировались эмпирические коэффициенты в формуле (1).

Влияние методики определения прочности раствора

Первоначально прочность раствора оценивалась по результатам испытаний кубов, получаемых в стальных формах с дном. В дальнейшем было предложено перейти к испытаниям кубов, получаемых в формах без дна и устанавливаемых на пористое основание (кирпич) для возможности отсоса влаги. Такой способ изготовления кубов представлялся более близким к поведению раствора при его твердении в кладке. В работе [9] Л.И. Онищик пишет, что «во всех таблицах нормативных сопротивлений кладки учтено влияние изменения методики изготовления кубиков раствора на их показатель прочности. При испытании с отсосом

Таблица 1
Table 1

Сравнительные испытания на сжатие керамического кирпича (камня) с выравниванием поверхностей различными способами
Comparative compression tests of ceramic brick (block) with surface leveling in different ways

Работа	Схема испытания	Вид кладочного элемента	Прочность образца с выравниванием поверхности (МПа)				
			Цементно-песчаным раствором $R_{1,р}$	Шлифованием $R_{1,ш}$ ($R_{1,ш}/R_{1,р}$)	Прокладками из войлока $R_{1,в}$ ($R_{1,в}/R_{1,р}$)	Без выравнивания $R_{1,б.в.}$ ($R_{1,б.в.}/R_{1,р}$)	Шлифованием с прокладками из войлока $R_{1,ш,в}$ ($R_{1,ш,в}/R_{1,р}$)
[16]	 <p>Два целых кирпича</p>	Кирпич полнотелый	14,2	16,1 (1,13)	9,7 (0,68)	13,5 (0,84)	
[17]		Кирпич полнотелый	54,5	73,5 (1,35)	–	–	–
		Кирпич пустотелый	20,2	26,2 (1,3)	–	–	–
[18]	 <p>Куб 50×50×50 мм</p>	Кирпич полнотелый	–	44,2	–	35,1 (0,79)	
[19]		Камень крупноформатный	–	14,7	–	–	11,2 (0,76)
[20]		Камень крупноформатный	14,1	18,8 (1,34)	–	–	–

влаги получается более высокая (примерно в два раза) прочность раствора. Формулы прочности кладки были подобраны для испытания кубиков раствора без отсоса влаги, почему с изменением методики нужно в формулах заменить прочность раствора R_2 на $1/2 R_2$.

Первоначально размер кубов для испытания раствора был 7 см, но затем был принят 7,07 см, что давало площадь сечения 50 см² и облегчало ручной счет. Следует отметить, что, например, в европейских нормах (EN 1015–11 [14]) прочность раствора оценивается по испытаниям кубов с размером ребра 4 см. Коэффициент перехода (коэффициент формы) в соответствии с ГОСТ 5802–86 [15] между ними равен 0,8. Таким образом, прочности раствора, равной, например, 10 МПа, определенной по [15], соответствует прочность раствора 8 МПа. При подстановке в формулу (1) разница в прочности кладки может составить около 5%, что не всегда учитывается исследователями.

Еще большую погрешность при оценке прочности кладки можно получить при определении прочности раствора различными косвенными методами, обычно применяемыми при обследовании. Как отмечалось, любой метод определения как прочности раствора, так и кирпича дает некую условную прочность. При пользовании таблицами в [3] или, что то же, формулой Л.И. Онищика прочность раствора и кирпича должна корректироваться с помощью переводных коэффициентов и градуировочных зависимостей.

Влияние методики определения прочности кирпича (камня)

В работах [16, 17] приведены результаты сравнительных испытаний образцов из керамического кир-

пича на сжатие при различных способах выравнивания их поверхности. В табл. 1 приведены результаты испытаний образцов, выполненных из двух целых кирпичей. Из них видно, что прочность кирпича с поверхностями, выровненными шлифованием, превышает прочность кирпича с поверхностью, выровненной раствором, в 1,13 – 1,35 раза для полнотелого кирпича и в 1,3 раза для пустотелого. При выравнивании поверхности прокладкой из войлока прочность, наоборот, снижается. Снижается прочность и при отсутствии мероприятий по выравниванию поверхности.

В работе [18] приведены результаты испытаний образцов в виде кубов с ребром 5 см, выпиленных из целых кирпичей. Шлифованные образцы показали увеличение прочности по сравнению с необработанными образцами в 1,26 раза.

В работах [19, 20] испытывались крупноформатные керамические камни. Показано, что у образцов с войлочной прокладкой, уложенной на шлифованную поверхность, прочность при сжатии оказывается ниже, чем у шлифованных образцов без прокладок, в 1,31 раза. При этом прочность шлифованных образцов превышает прочность образцов, у которых поверхность выровнена раствором, в 1,34 раза.

В приведенных выше работах анализируется также влияние формы образцов, изготовленных из двух уложенных друг на друга целых кирпичей или их половинок. Показано некоторое увеличение прочности в последнем случае.

Анализ приведенных в табл. 1 результатов испытаний различных авторов позволяет сделать следующие выводы. Выравнивание поверхности образцов

шлифованием позволяет получить прочность образцов с выровненной поверхностью практически на одну марку выше. При укладке на шлифованную поверхность войлока прочность снижается примерно на 25% и, таким образом, прочность становится ближе к прочности образцов, испытанных с выравниванием раствором.

На прочность кирпича при испытании на сжатие помимо неровности его поверхности, вызывающей концентрацию напряжений, способствующих изгибу и срезу, большую роль играет сдерживание поперечных деформаций плитами пресса. Применение войлочных прокладок снижает трение о плиты пресса, благодаря чему характер разрушения несколько изменяется. Наибольший разброс результатов у большинства исследователей наблюдался на шлифованных образцах и наименьший – в случае применения войлочных прокладок.

Следует отметить, что ни один из приведенных методов испытания не показывает в полной мере реальную прочность кирпича в кладке. Как и прочность раствора, определяемая по результатам испытаний кубов, это некая условная величина. При выводе формулы (1) Л.И. Онищик заложил туда значения прочности кирпича при сжатии R_1 , получаемые путем испытания в прессе на сжатие кирпичей, поверхности которых выравнивают раствором. При изменении метода испытания кирпича потребовалось бы изменение эмпирических коэффициентов в формуле (1), как это показано выше на примере прочности раствора.

В прежней редакции ГОСТ 530–2007 [21] взамен способа выравнивания поверхности керамических кирпичей и камня пластического формования раствором был предложен способ выравнивания шлифованием. При этом между плитой пресса и образцом укладывалась прокладка из войлока. Благодаря тому, что войлочная прокладка компенсировала увеличение прочности шлифованных образцов, существенных последствий это не имело.

В новой редакции ГОСТ 530–2012 [22] основным способом выравнивания поверхности образцов принято шлифование и в отличие от прежней редакции без применения войлочной прокладки.

В европейском стандарте EN 772-1 [23] и идентичном ему белорусском стандарте СТБ EN 772-1 [24] выравнивание поверхности производится двумя способами – шлифованием и раствором. Отклонение от плоскостности нагружаемых поверхностей образца не должно превышать 0,1 мм на каждые 100 мм длины. Отклонение от прямолинейности верхней поверхности образца не должно превышать 1 мм на каждые 100 мм длины. Если эти требования не выполняются, то поверхности выравниваются шлифованием или раствором. Способ подготовки поверхности указывают в протоколе испытаний.

Для выравнивания применяют цементно-песчаный раствор, прочность которого, определяемая по испытаниям кубов в соответствии с EN 1015-11 [14],

равна минимальному нормируемому значению прочности при сжатии кирпича, камня, блока, но не выше 30 МПа. При коэффициенте перехода (коэффициенте формы), равном 0,8, прочности раствора 30 МПа, определенной по [14], соответствует прочность раствора 37,5 МПа по ГОСТ 5802–86 [15].

При назначении нормативной прочности полученное из испытаний значение умножают на коэффициент, зависящий от соотношения высоты и ширины (длины).

Требования к качеству поверхности, подготовленной шлифованием, в действующем ГОСТ 530–2012 [22], идентичны европейским [24].

Следует отметить несогласованность действующих в РФ ГОСТов. Так, в ГОСТ 8462–85 [25], действующем наравне с [22], основным способом подготовки поверхности образцов (в том числе и из керамического кирпича пластического формования) является выравнивание поверхности цементно-песчаным раствором. Коэффициент перехода в [25] от прочности, определенной по альтернативной методике, к основной вычисляют по формуле:

$$K = R_1/R_2 \quad (5)$$

где R_1 – предел прочности при сжатии образцов из кирпича или камней, изготовленных с выравниванием поверхностей раствором; R_2 – предел прочности при сжатии образцов, поверхности которых выровнены альтернативным способом.

Образцы из силикатного кирпича (камня) и керамического кирпича полусухого прессования, имеющие благодаря применяемой технологии ровные поверхности, испытывают насухо, не производя выравнивания их поверхностей цементным раствором.

В случае проверки потребителем, а также при арбитражных проверках образцы для определения предела прочности при сжатии кирпича и камней пластического формования изготавливают с выравниванием поверхности раствором.

В настоящее время на ряде заводов выпускаются керамические камни со шлифованной поверхностью. Работа таких камней в кладке отличается в лучшую сторону по сравнению с аналогичными камнями с нешлифованной поверхностью. Для таких камней определение прочности при сжатии, естественно, должно проводиться при шлифованных поверхностях и назначения коэффициентов перехода для них не требуется.

В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко в настоящее время по заказу ФАУ ФЦС ведется работа по сравнительным испытаниям кирпича и камня на сжатие при различных способах подготовки поверхности. С учетом имеющихся результатов испытаний будут получены соответствующие коэффициенты перехода.

Снижение влияния изгиба и среза кирпича в кладке при улучшении качества его поверхности в российских нормах учитывается при назначении марки кирпича по прочности [25–27] и частично в [22]. Так, для кирпича полусухого прессования и силикатного,

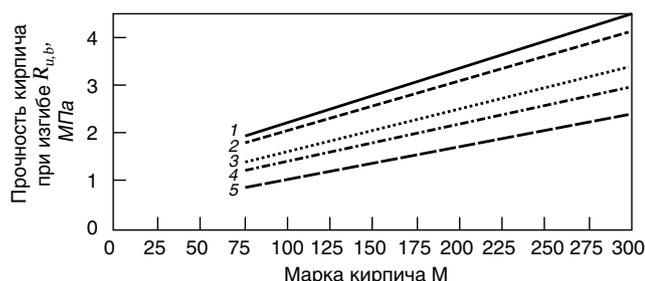


Рис. 5. Зависимость требуемой прочности кирпича на изгиб $R_{u,b}$ от его марки по прочности M : 1 – керамический полнотелый пластического формования; 2 – силикатный пустотелый высотой 65 мм и полнотелый высотой 88 мм; 3 – керамический пустотелый высотой 65 мм; 4 – керамический высотой 88 мм; 5 – силикатный пустотелый высотой 88 мм
Fig. 5. Dependence of the required bending strength of a brick $R_{u,b}$ on its strength grade M : 1 – solid ceramic plastic molding; 2 – silicate hollow 65 mm high and solid 88 mm high; 3 – ceramic hollow with a height of 65 mm; 4 – ceramic, 88 mm high; 5 – silicate hollow, 88 mm high

имеющего относительно ровные горизонтальные поверхности, требования к прочности на изгиб являются не столь жесткими, как для полнотелого кирпича пластического формования (рис. 5). Например, для кирпича полусухого прессования марки 100 средняя величина прочности при изгибе должна быть не менее 1,6 МПа, а для кирпича пластического прессования, горизонтальные поверхности которого, как правило, менее ровные, составляет 2,2 МПа.

Как отмечалось выше, для случаев определения прочности раствора существует множество прямых и косвенных методов оценки прочности кирпича (каменя), применяемых главным образом при обследованиях. Основными ошибками при этом являются следующие.

Не всегда строится градуировочная зависимость для перехода от показаний прочности, получаемой косвенным методом, к показаниям прочности, получаемой прямым методом, по испытаниям кубов в соответствии с ГОСТ [15].

При отборе кернов, простукивании склерометрами и т. п. часто не учитывается ориентация кирпича, обладающего ярко выраженной анизотропией свойств по различным направлениям. Кроме того, ни один из косвенных методов не позволяет оценить прочность кирпича на изгиб, которая учитывается в формуле (2) при назначении конструктивного коэффициента в формуле Л.И. Онищика. Отметим, что часто даже при отборе кирпича из кладки ограничиваются его испытанием только на сжатие, что также не позволяет корректно определить величину его конструктивного коэффициента в формуле (2) и соответственно может привести к завышенной оценке прочности кладки.

С сожалением приходится констатировать, что в [22] требования по минимальной прочности кирпича при изгибе при назначении марки изделия были сняты для кирпичей низких марок, зачастую трещиноватых и имеющих низкую изгибную прочность.

Влияние габаритов и формы экспериментальных образцов кладки на показатели прочности

В СССР испытания кладки на сжатие проводились преимущественно в ЦНИИСК (ранее ЦНИПС)

на образцах в виде столбов с габаритами в плане, как правило, $0,38 \times 0,38$ и $0,38 \times 0,51$ м. Отношение высоты к меньшему сечению в плане составляет 2,9, а к большему 2,2. При таком соотношении вблизи верхней и нижней опор поперечные деформации кладки экспериментальных образцов сдерживаются стальными пластинами, подлитыми на растворе, что повышает прочность кладки не только на опорах, но и в середине по высоте столба. В работе [9] приведены данные о том, что прочность эталонных столбов оказывается завышенной на 5–10% по сравнению с призмной прочностью (при отношении высоты к стороне поперечного сечения, равном 3), которую следовало бы учитывать при расчете на сжатие длинных столбов. Тем более некорректными являются результаты испытаний кладки в виде коротких призм и столбов.

В работе [28] Л.И. Онищиком была предложена экспериментальная формула, позволяющая оценить влияние размеров и формы образцов:

$$R' = 0,8 R_0 + (2p/F) R_0, \quad (6)$$

где R_0 – прочность кладки эталонного образца размером 40×40 см; R' – прочность кладки образца заданных размеров и формы; F – площадь сечения образца в см^2 ; p – учитываемый периметр в см (за вычетом сторон входящих углов).

В этой же работе приводятся переходные коэффициенты к размеру и форме образцов (табл. 2).

Влияние габаритов образцов кладки при сравнении ее прочности с приведенными в таблицах расчетных сопротивлений практически никогда не анализируется, что нередко приводит к некорректным выводам.

В ГОСТе [13] даны два типа экспериментальных образцов – стенки, заимствованные из EN 1052–1–2009 [29], и традиционные для российских методов испытаний столбы. Как видно из табл. 2, полученные

Таблица 2

Table 2

Относительные показатели прочности кирпичных столбов и стен в зависимости от их абсолютных размеров по формуле (6) [28]
 Relative indicators of the strength of brick pillars and walls, depending on their absolute dimensions according to the formula (6) [28]

Размеры в плане столба и стены, см	R' / R_0
25×25	1,12
38×38	1,01
38v51	0,98
51×51	0,96
51×64	0,92
64×64	0,92
12×100	1,13
25×100	0,96
38×100	0,91
51×100	0,88

из испытаний образцов стенок и столбов значения прочности кладки могут отличаться в ту или иную сторону от среднего значения на 12%, полученного из испытаний столбов с габаритами в плане, близкими к $0,4 \times 0,4$ или $0,4 \times 0,5$ м. Таким образом, целесообразно внести в ГОСТ [13] коэффициенты формы, с помощью которых полученная из испытаний прочность кладки приводится к единому стандарту. Повышение прочности кладки в стенках толщиной 12 см учитывается в СП [3] (ранее и в СНиПе [30]) введением к расчетному сопротивлению кладки коэффициента условий работы, равного 1,2. Там же для круглых сечений этот коэффициент равен 0,8, что связано с более низким качеством кладки.

Общий вид формулы Л.И. Онищика

Целесообразно временное сопротивление кладки сжатию R_u вычислять по следующей видоизмененной формуле (1):

$$R_u = K_{рука\ камня} K_{габар} AR_1 \left(1 - \frac{a}{b + 1/2 R_2 / R_1} \right)^\gamma, \quad (7)$$

где R_u – временное сопротивление кладки сжатию, определенное из испытаний столбов с габаритами в плане $0,38 \times 0,51$ см.

Заключение

При выравнивании поверхности способами, отличающимися от основного способа выравнивания раствором, следует вводить коэффициент перехода в соответствии с ГОСТ 8462–85 [25]. В противном случае марка кирпича будет отличаться от полученной по методике Л.И. Онищика и при подстановке в таблицы расчетных сопротивлений кладки в СП 15.13330 [3] можно получить их некорректные значения.

Для восстановления взаимосвязи между ГОСТами на испытания и сводом правил возможно внести в [3] коррективы по назначению расчетных сопротивлений кладки. Для этого в таблицах указываются два значения марки керамического кирпича в зависимости от способа подготовки поверхности при испытаниях на сжатие – по ГОСТам [21] и [25]. Для силикатных кирпичей и керамических полусухого прессования изменения не требуются.

Данное решение является компромиссным. Оно позволяет сохранить прежние запасы прочности для каменной кладки, которые были искусственно снижены после выхода ГОСТа [21] при назначении основным способом подготовки поверхности шлифования. Вместе с тем возникает диспропорция при сравнении марки керамического кирпича пластического формования с силикатным или полусухого прессования, поскольку марка кирпича силикатного и полусухого прессования назначается по прежним правилам.

В этой связи оптимальным является введение в ГОСТ [21] для кирпича пластического формования коэффициентов перехода от прочности шлифованного кирпича к прочности кирпича с выровненной

раствором поверхностью. Способ испытания кирпича с выровненной раствором поверхностью следует считать основным и марку кирпича устанавливать по нему. На кирпич и камень, выпускаемые со шлифованной поверхностью, это требование не распространяется. Во всех случаях марка назначается с учетом прочности на изгиб.

Не менее важным является не потерять связь вновь разрабатываемых косвенных методов испытаний раствора и кирпича непосредственно в кладке или по отбираемым из них образцам с прямыми методами испытаний.

Приведенные в ГОСТе на испытания кладки типы образцов частично позаимствованы из европейских норм. При этом не учитывается, что при назначении прочности кладки при сжатии в нормах принимались результаты испытаний столбов определенных габаритов. Испытание стенок наряду со столбами без учета масштабного фактора, формы приводит к некорректным результатам.

В настоящее время осуществляется пересмотр ряда нормативных документов по каменной кладке и стоит задача внести в них коррективы, восстанавливающие их взаимосвязь.

Выводы

1. В основу советских норм по каменным конструкциям для определения прочности кладки при осевом сжатии заложена формула Л.И. Онищика, устанавливающая связь между прочностью кирпича (камня) и раствора с прочностью кладки при сжатии. Сопротивления кладки сжатию в нормах подсчитывались по этой формуле.

2. Получаемые в испытаниях прочностные характеристики кирпича (камня) раствора носят условный характер и во многом зависят от способа изготовления, формы, габаритов образцов для испытаний.

3. Эмпирические коэффициенты в формуле Л.И. Онищика зависят от выбранной методики испытания кладочных материалов. С изменением методов испытаний корректировались и коэффициенты.

4. В последние годы ГОСТы на испытания каменных материалов существенно изменились, что, с одной стороны, было вызвано появлением новых материалов, а с другой – с попыткой «гармонизировать» наши нормативные документы с европейскими. Происходит нарушение взаимосвязи между методами испытаний материалов с нормами по проектированию, что в ряде случаев приводит к необоснованному завышению прочности кладки и тем самым к снижению надежности конструкций.

5. Среди наиболее существенных проблем видится введение в ГОСТы коэффициентов перехода от способа выравнивания поверхности кирпича шлифованием к выравниванию раствором, восстановление для кирпичей с низкой прочностью требования проверки прочности на изгиб при назначении марки изделия, существенная переработка вновь разработанного ГОСТа на испытания кладки и ряд других.

Список литературы

1. Онищик Л.И. Каменные и армокаменные конструкции промышленных и гражданских зданий. М.; Л.: Стройиздат, 1939. 208 с.
2. Поляков С.В. Длительное сжатие кирпичной кладки. М.: Госстройиздат, 1959. 183 с.
3. СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции. М.: Стандартинформ, 2019. 149 с.
4. Гениев Г.А., Курбатов А.С., Самедов Ф.А. Вопросы прочности и пластичности анизотропных материалов М.: ИНТЕРБУК, 1993. 187 с.
5. Samarasinghe W., Page A.W., Hendry A.W. A finite element model for the in-plane behaviour of brickwork. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1982. Vol. 73, pp. 171–178.
6. Ишук М.К. Роль прочности кирпича на изгиб при работе каменной кладки на сжатие // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 63–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-63-65>
7. Лент Л.Б., Пиккиева А. Кирпич и кирпичная кладка в США: Исследования и испытания / Под ред. Л. Онищика. М.; Л.: ОНТИ. Глав. ред. строит. лит-ры, 1937. 123 с.
8. Ишук М.К., Ишук Е.М., Фролова И. Г. Совместная работа «старой» и «новой» кладок на участках с вычинкой // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 1. С. 28–30.
9. Онищик Л.И. Нормы проектирования каменных и армокаменных конструкций. В кн. Нормы проектирования конструкций. Материалы урочного положения. 4-я редакция. М.: Изд-во. Министерства строительства предприятий машиностроения, 1949. С. 37–65.
10. Молявко-Высоцкий А.П. Роль раствора и различных факторов в прочности кладки. Ростов н/Д: Азово-Черноморское краевое книгоиздательство, 1935. 69 с.
11. Камейко В.А, Семенцов С.А. Состояние и основные направления исследования прочности каменных конструкций. В сб.: *Теоретические и экспериментальные исследования каменных конструкций*. М. 1978. С. 6–46.
12. Некрасов В.П. Теория прочности каменных кладок. М.: Стройиздат, 1947. 158 с.
13. ГОСТ 32047–2012 Кладка каменная. Метод испытания на сжатие. М.: Стандартинформ, 2014. 9 с.
14. DIN EN 1015-11–2020 Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 2020.
15. ГОСТ 5802–86 Растворы строительные. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2018. 17 с.
16. Порядина Н.А., Серебряная И.А. Статистический анализ применимости альтернативного метода испытания на прочность при осевом сжатии. *Сб. трудов VI Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке и образовании»*. 2018. С. 187–190. <https://doi.org/10.23947/itno.2018.1.187-190>
17. Деркач В.Н., Галалюк А.В. Влияние подготовки поверхности кладочного элемента на прочность при сжатии, определяемую согласно EN 772-1 // *Строительная наука и техника*. 2010. № 5. С. 47–50.
18. Fódi A. Effects influencing the compressive strength of a solid, fired clay brick // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2011. Vol. 55(2), pp. 117–128. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2011-2.04>
19. Сапелин Н.А., Ким Д.И. Методы определения прочности керамических камней // *Технологии бетонов*. 2010. № 3–4. С. 10–11.
20. Сапелин Н.А., Ким Д.И. Определение прочности при сжатии крупноформатных керамических камней: анализ российских и европейских методик испытаний // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2012. № 12. С. 46–48.
21. ГОСТ 530–2007 Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 39 с.
22. ГОСТ 530–2012 Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 27 с.
23. EN 772–1 Methods of test for masonry units. Part 1: Determination of compressive strength (British Standards Institute, 2011).
24. СТБ EN 772–1 Методы испытаний строительных блоков. Ч. 1. Определение прочности при сжатии. Минск: Госстандарт, 2008. 9 с.
25. ГОСТ 8462–85 Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. М.: Стандартинформ, 2011. 7 с.
26. ГОСТ 7484–78 Кирпич и камни керамические лицевые. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2001. 6 с.
27. ГОСТ 379–1995 Кирпич и камни силикатные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 22 с.
28. Онищик Л.И. Особенности работы каменных конструкций под нагрузкой в стадии разрушения. *Сб. статей Исследования по каменным конструкциям*. М.; Л.: ЦНИПС, Стройиздат, 1949. С. 5–44.
29. EN 1052–1–2009 Methods of test for masonry. Part 1. Determination of compressive strength.
30. СНиП П–22–81* Каменные и армокаменные конструкции. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 61 с.

References

1. Onishchik L.I. Kamennye i armokamennye konstruksii promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy [Masonry and reinforced masonry structures of industrial and civil buildings]. Moscow–Leningrad: Stroyizdat. 1939. 208 p.
2. Polyakov S.V. Dlitel'noe szhatie kirpichnoi kladki [Prolonged compression of brickwork]. Moscow: Gosstroyizdat. 1959. 183 p.

3. Set of Rules 15.13330.2012. Kamennye i armokamennye konstruksii [Masonry and reinforced masonry structures]. Moscow: Standartinform. 2019. 149 p. (In Russian).
4. Geniev G.A., Kurbatov A.S., Samedov F.A. Voprosy prochnosti i plastichnosti anizotropnykh materialov [Issues of strength and plasticity of anisotropic materials]. Moscow: INTERBUK. 1993. 187 p.
5. Samarasinghe W., Page A.W., Hendry A.W. A finite element model for the in-plane behaviour of brickwork. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1982. Vol. 73, pp. 171–178.
6. Ishchuk M.K. The role of brick bending strength at compression of masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 63–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-63-65> (In Russian).
7. Lent L.B., Pikkieva A. Kirpich i kirpichnaya kladka v SShA: (Issledovaniya i ispytaniya) [Brick and Brickwork in the USA: (Research and Testing)] Ed. by L. Onishchik. Moscow; Leningrad: ONTI. Chapters ed. builds. Literature.1937. 123 p.
8. Ishchuk M.K., Ishchuk E.M., Frolova I.G. The joint work of the “old” and “new” masonry in the walls under restoration. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No. 1, pp. 28–30. (In Russian).
9. Onishchik L.I. Normy proektirovaniya kamennykh i armokamennykh konstruksii. V kn. Normy proektirovaniya konstruksii. Materialy urochnogo polozheniya. Chetvertaya redaktsiya [Standards for the design of masonry and reinforced-masonry structures. In a book: Standards for the design of structures. Materials of the curriculum. Fourth edition]. Moscow: Publishing House of the Ministry of Construction of Engineering Enterprises. 1949, pp. 37–65.
10. Molyavko-Vysotskii A.P. Rol' rastvora i razlichnykh faktorov v prochnosti kladki [The role of mortar and various factors in the strength of the masonry]. Rostov-on-Don: Azov-Chernomorskoe regional book publishing. 1935. 69 p.
11. Kameiko V.A., Sementsov S.A. State and main directions of research of the strength of masonry structures. *In the collection Theoretical and experimental studies of stone structures*. Moscow. 1978, pp. 6–46. (In Russian).
12. Nekrasov V.P. Teoriya prochnosti kamennykh kladok [The theory of the strength of masonry]. Moscow: Stroyizdat. 1947. 158 p.
13. GOST 32047–2012 Kladka kamennaya. Metod ispytaniya na szhatie [Masonry. Compression test method]. Moscow: Standartinform. 2014. 9 p. (In Russian).
14. DIN EN 1015-11–2020 Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 2020.
15. GOST 5802–86 Rastvory stroitel'nye. Metody ispytaniya [Building solutions. Test methods]. Moscow: Standartinform. 2018. 17 p. (In Russian).
16. Poryadina N.A., Serebryanaya I.A. Statistical analysis of the applicability of an alternative method of testing strength under axial compression. *In the collection proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference “Innovative technologies in science and education”*. 2018, pp. 187–190. <https://doi.org/10.23947/itno.2018.1.187-190>
17. Derkach V.N., Galalyuk A.V. Influence of surface preparation of a masonry element on compressive strength determined according to EN 772-1. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. 2010. No. 5, pp. 47–50. (In Russian).
18. Fódi A. Effects influencing the compressive strength of a solid, fired clay brick. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2011. Vol. 55 (2), pp. 117–128. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2011-2.04>
19. Sapelin N.A., Kim D.I. Methods for determining the strength of ceramic blocks. *Tekhnologii betonov*. 2010. No. 3–4, pp. 10–11. (In Russian).
20. Sapelin N.A., Kim D.I. Determination of compressive strength of large-format ceramic blocks: analysis of Russian and European test methods. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2012. No. 12, pp. 46–48. (In Russian).
21. GOST 530–2007 Kirpich i kamen' keramicheskie. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Ceramic bricks and blocks. General technical conditions]. Moscow: Standartinform. 2007. 39 p. (In Russian).
22. GOST 530–2012 Kirpich i kamen' keramicheskie. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Ceramic bricks and blocks. General technical conditions]. Moscow: Standartinform. 2013. 27 p. (In Russian).
23. EN 772-1 Methods of test for masonry units. Part 1: Determination of compressive strength (British Standards Institute, 2011).
24. STB EN 772–1 Metody ispytaniya stroitel'nykh blokov. Chast' 1. Opredelenie prochnosti pri szhatii [Test methods for building blocks. Part 1. Determination of compressive strength]. Minsk: Gosstandart. 2008. 9 p. (In Russian).
25. GOST 8462–85 Wall materials. Methods for determining the ultimate strength in compression and bending. Moscow: Standartinform. 2011. 7 p. (In Russian).
26. GOST 7484–78 Kirpich i kamni keramicheskie litseve. Tekhnicheskie usloviya [Face ceramic bricks and blocks. Technical conditions]. Moscow: Publishing house of standards. 2001. 6 p. (In Russian).
27. GOST 379–1995 Kirpich i kamni silikatnye. Tekhnicheskie usloviya [Silicate bricks and blocks. Technical conditions]. Moscow: Standartinform. 2015. 22 p. (In Russian).
28. Onishchik L.I. Features of the work of masonry structures under load in the stage of destruction. *Digest of articles “Research on stone structures”* Moscow-Leningrad: TsNIPS, Stroyizdat. 1949, pp. 5–44. (In Russian).
29. EN 1052–1–2009 Methods of test for masonry. Part 1. Determination of compressive strength.
30. SNiP II–22–81* Kamennye i armokamennye konstruksii [Masonry and reinforced masonry structures]. Moscow: FGUP TsPP. 2004. 61 p. (In Russian).

Как подготовить к публикации научно-техническую статью



Журнальная научно-техническая статья – это сочинение небольшого размера, 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 «Строительные материалы»® 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 (ссылки на авторефераты диссертаций не допускаются).
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 2–5 лет 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 5 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.

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, *.docx или *.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом не менее 100 слов на русском и английском языках; подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы»®, ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания; сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов. Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»® был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала www.rifsm.ru/files/aytoru.pdf

Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства <http://www.rifsm.ru/page/88>

22-23 СЕНТЯБРЯ / 2020

III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ»

Организаторы конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Место проведения:

МОСКВА
Холидей Инн Сущевский
(Holiday In Sushevsky)
ул. Сущевский Вал, 74

Генеральный спонсор



Генеральные информационные партнеры



www.fc-union.com, info@fc-union.com

тел.: +7 (495) 66-55-014, моб.: +7 916 36-857-36



7–8 ОКТЯБРЯ 2020 г.
РОСТОВ-НА-ДОНУ. РОССИЯ
Marins Park Hotel Rostov



7–8 on OCTOBER, 2020
ROSTOV-ON-DON. RUSSIA
Marins Park Hotel Rostov

THE SCIENTIFICALLY-PRACTICAL CONFERENCE
«DEVELOPMENT OF THE CERAMIC INDUSTRY OF RUSSIA»

KERAMTEX



**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ:
СИМПОЗИУМ «НАУКА – КЕРАМИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ»
6 октября 2020 г.**

**SPECIAL PROJECT: SYMPOSIUM «THE SCIENCE – FOR CERAMIC PRODUCTION»
6 on OCTOBER, 2020**

Партнеры МИАП KERAMTEX / KERAMTEX' partners



**Посещение завода «Донской кирпич» и предприятий ГК UNITILE
«Шахтинская плитка» и «Шахтинские смеси»**

Visit to brick-plant «Donskoy kirpich» and The Unitile Group of Companies
Уникальный Музей кирпича / the brick Museum

www.rifsm.ru

mail@rifsm.ru

www.journal-cm.ru