

ISSN 2076-0655

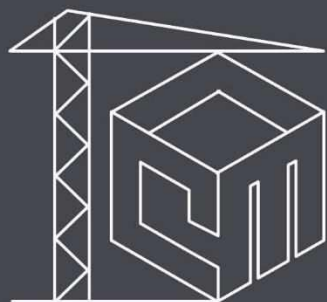
---

# ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СИЛИКАТОВ ENGINEERING AND TECHNOLOGY OF SILICATES

---

*НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ПО ВЯЖУЩИМ, КЕРАМИКЕ,  
СТЕКЛУ И ЭМАЛЯМ*  
*SCIENCE AND TECHNOLOGY JOURNAL OF BINDERS, CERAMICS,  
GLASS AND ENAMELS*

---



IV Всероссийская научная конференция

**СТРОИТЕЛЬНОЕ  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

настоящее и будущее

**5**

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК**

**2025**

Москва

# ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СИЛИКАТОВ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ПО ВЯЖУЩИМ, КЕРАМИКЕ, СТЕКЛУ И ЭМАЛЯМ

Том 32, № 5 (специальный выпуск)

Ноябрь – Декабрь, 2025

Журнал издается с 1994 г. В нем публикуются актуальные материалы по широкому кругу вопросов техники и технологии силикатов, строительному материаловедению, по вопросам современного производства строительных материалов и изделий, новости науки и техники. Журнал оказывает поддержку аспирантам, докторантам, молодым ученым и специалистам промышленности, публикует их работы по вопросам техники и технологии силикатов в первую очередь.

Главный редактор **КРИВОБОРОДОВ Ю. Р.**, д-р техн. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева. E-mail: [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru)

Редактор-консультант **КУЗНЕЦОВА Т. В.**, д-р техн. наук, проф. E-mail: [tkouzn@mail.ru](mailto:tkouzn@mail.ru)

## Редакционный совет

ГУСЕВ Б.В., Международная инженерная академия, президент, чл.-корр. РАН;  
КУЗНЕЦОВА Т. В., Международная инженерная академия, д-р техн. наук;  
КРИВОБОРОДОВ Ю. Р., д-р техн. наук, проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева;  
БУРЛОВ Ю.А., ОАО «Подольск-Цемент», генеральный директор, д-р экон. наук;  
КРАСНЫЙ Б.Л., ЗАО НТЦ «Бакор», генеральный директор, д-р техн. наук;  
СИГАЕВ В.Н., д-р хим. наук, РХТУ им. Д. И. Менделеева, проф.;  
СОЛНЦЕВ С.С., ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, советник генерального директора, д-р техн. наук, проф.

## Редакционная коллегия

БЕЛЯКОВ А.В., проф., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия;  
БОБКОВА Н.М., проф., Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь;  
БУРЬЯНОВ А.Ф. исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации, проф. Московского государственного строительного университета, Москва, Россия  
ВЕРЕЩАГИН В.И., проф., Томский политехнический университет, Томск, Россия;  
ЕРОФЕЕВ В.Т., академик РААС, Москва, Россия;  
ЗАГОРОДНЮК Л.Х., проф., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия;  
КУРДОВСКИЙ В., проф., Горнометаллургическая академия, Краков, Польша;  
КОЛЕСНИКОВ А.С., проф. Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Чимкент, Казахстан;  
КОНДРАЩЕНКО В.И. проф., Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия;  
КОРШУНОВ А.В., проф., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия;  
МАЦЕЕВИЧ Т.А., проф., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия;  
НИЯЗБЕКОВА Р.К., проф., Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан;  
ПАЛЕАРИ А., проф., Университет Милано-Бикокка, Милан, Италия;  
ПОТАПОВА Е.Н., проф., РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия;  
ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ В.Б., проф., Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия;  
САМЧЕНКО С.В., проф., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия;  
САНИЦКИЙ М.А., проф., Национальный университет «Львовская политехника», Украина  
ТАЛИПОВ Н.Х., проф. Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан  
УШКОВ В.А., проф., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия;  
ФЕДЮК Р.С., проф., Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

**Учредитель и Издатель** – ИП Самченко С.В. Периодическое печатное издание, журнал. Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации серия ПИ № ФС77-81382 от 07 июля 2021 г. Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны. Языки: русский, английский.

Подписной индекс 87947 в объединенном каталоге «Пресса России»

**Адрес редакции:** 117321, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 136, к. 4, кв. 283; 123514, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, корп. 1, стр. 4 РХТУ им. Д. И. Менделеева

Тел./факс: (495) 496-60-09 E-mail: [info@tsilicates.ru](mailto:info@tsilicates.ru); [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru) Интернет: <https://tsilicates.ru>

*По решению ВАК Министерства образования и науки РФ журнал включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»: 2.1.5 – Строительные материалы и изделия, 2.6.14 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, 2.6.17 – Материаловедение*

**Белый список, К2**

# TECHNIQUE AND TECHNOLOGY OF SILICATES

SCIENCE AND TECHNOLOGY JOURNAL OF BINDERS, CERAMICS, GLASS AND ENAMELS

Vol. 32, No. 5 (special edition)

November - December, 2025

Journal is published since 1994. It publishes relevant materials on the problems of modern production, information on economic and financial issues, science and technology news, reports of new raw materials and products.

Journal provides support for students, doctoral students, young scientists and specialists of industry and publishes their works on a wide range of questions of technique and technology of silicates in the first place.

**Editor-in-Chief KRIVOBORODOV Yu. R.**, Dr. Sci., prof., D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR). E-mail: [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru)

**Editor-consultant KOUZNETSOVA T. V.**, Dr. Sci., prof. E-mail: [tkouzn@mail.ru](mailto:tkouzn@mail.ru)

## Editorial Council

GUSEV B. V., president of the REA, academician;

KOUZNETSOVA T. V., academician of the REA;

KRIVOBORODOV Yu. R., Dr. Sci., prof., D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR)

BURLOV Yu. A., JSC «Podolsk-Cement», general director, Dr. Econ. Sci.;

KRASNY B. L., JSC «Bakor», general director, Dr. Sci.;

SIGAEV V. N., MUSTR, Dr. Sci., prof.;

SOLNTSEV S. S., FGUP «VIAM» GNZ RF, adviser of general director, Dr. Sci., prof.

## Editorial board

BELAKOV A. V., prof., MUCTR, Moscow;

BOBKOVA N. M., prof., Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus;

BURYANOV A.F. Executive Director of the Russian Gypsum Association, prof. of the Moscow State University of Civil Engineering, Moscow;

VERESHCHAGIN V. I., prof., Tomsk Polytechnical University;

EROFEEV V.T., academician of the RAAS

ZAGORODNYUK L.Kh., prof., Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod;

KURDOWSKI W., prof., Academia Gorniczno-Hutnicza, Krakow, Poland;

KOLESNIKOV A.S., prof. South Kazakhstan University named after. M. Auezova, Chimkent, Kazakhstan

KONDRASHENKO V.I., prof., Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia;

KORSHUNOV A.V., prof., National Research University MGSU, Moscow;

MATSEEVICH T.A., prof., National Research University MGSU, Moscow;

NIYAZBEKOVA R. K., prof., L. N. Gumilyov Eurasian University, Astana, Kazakhstan;

PALEARI A., prof., University of Milano-Bicocca, Milan, Italy;

POTAPOVA E.N., prof., MUSTR, Moscow

PETROPAVLOVSKAYA V.B., prof., Tver State Technical University, Tver,

SAMCHENKO S.V., prof., National Research University MGSU, Moscow;

SANITSKIY M. A., prof., Lviv Polytechnic National University, Ukraine

TALIPOV N.Kh., prof. Tashkent State Technical University, Uzbekistan

USHKOV V.A., prof., National Research University MGSU, Moscow;

FEDYUK R.S., prof., Far Eastern Federal University, Vladivostok

**Publisher** – IP Samchenko S.V.

**Subscription:** Union catalogue «Press of Russia», index 87947

**Address of editorial office:** 117321, Moscow, Profsoyuznaya st., 136, bldg. 4, apt. 283; 123514, Moscow, Panfilovtsev Geroyev St., 20, bldg. 1, p. 4, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

Tel./fax +7 Тел./факс: (495) 496-60-09 E-mail: [info@tsilicates.ru](mailto:info@tsilicates.ru) ; [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru) Internet: <https://tsilicates.com>

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b>IV Всероссийская научная конференция «Строительное материаловедение: настоящее и будущее»</b>	410
<b>К 95-летию со дня рождения ЮРИЯ МИХАЙЛОВИЧА БАЖЕНОВА</b>	412
<i>Трунтов Н.С., Шукишин Ф.Б., Самченко С.В.</i>	
<b>РАСШИРЕНИЕ ЦЕМЕНТА, СВЯЗАННОЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ЭТТРИНГИТА</b>	413
<i>Мин Хеин Хтет, Аунг Чжо Чжо, Потапова Е.Н.</i>	
<b>РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ШТУКАТУРНОЙ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО ЦЕМЕНТА</b>	422
<i>Баруздин А.А., Закревская Л.В., Доброхотов В.Б.</i>	
<b>ДЕКОРАТИВНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ РЕЦИКЛИНГА ОТХОДОВ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ</b>	434
<i>Тхет Наинг Мьинт, Хтет Паинг Аунг, Кривобородов Ю.Р.</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ ДВУВОДНОГО ГИПСА И ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА СУЛЬФОАЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ</b>	446
<i>Бахарев М.В., Кондращенко В.И.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЩЕЛОЧНО-КРЕМНЕЗЕМНОЙ КОРРОЗИИ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b>	456
<i>Николаев Д.Р., Жуков А.Д., Медведев А.А.</i>	
<b>ЛЕГКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДРОБЛЕННОГО ПЕНОСТЕКЛА</b>	466
<i>Урбанов А.В., Потапова Е.Н.</i>	
<b>ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДОБАВОК МОДИФИКАТОРОВ</b>	475
<i>Абд Алвахед Ф., Кривобородов Ю.Р.</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА НЕЙТРАЛИЗАЦИЮ ЩЕЛОЧНО-КРЕМНЕЗЕМНОЙ РЕАКЦИИ</b>	485

## CONTENTS

	Pp
<b>IV All-Russian Scientific Conference "Construction Materials Science: Present and Future"</b>	<b>410</b>
<b>On the 95th anniversary of the birth of YURI MIKHAILOVICH BAZHENOV</b> <i>Truntov N.S., Shukshin F.B., Samchenko S.V.</i>	<b>412</b>
<b>CEMENT EXPANSION ASSOCIATED WITH ETTRINGITE FORMATION</b> <i>Min Hein Htet, Aung Kyaw Kyaw, Potapova E.N.</i>	<b>413</b>
<b>DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS OF PLASTER WATERPROOFING MIXTURE USING SULFOALUMINATE CEMENT</b> <i>Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V., Dobrokhotov V.B.</i>	<b>422</b>
<b>DECORATIVE COMPOSITE MATERIAL BASED ON WASTE RECYCLING OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE AND BUILDING CERAMICS</b> <i>The Naing Myint, Htet Paing Aung, Krivoborodov Yu.R.</i>	<b>434</b>
<b>THE INFLUENCE OF GYPSUM DIHYDRATE AND PLASTICIZING ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF SULFOALUMINATE CEMENTS</b> <i>Bakharev M.V., Kondrashchenko V.I.</i>	<b>446</b>
<b>MODELING OF ALKALI-SILICA CORROSION OF PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES</b> <i>Nikolaev D.R., Zhukov A.D., Medvedev A.A.</i>	<b>456</b>
<b>LIGHTWEIGHT CERAMIC PRODUCTS USING CRUSHED FOAM GLASS</b> <i>Urbanov A.V., Potapova E.N.</i>	<b>466</b>
<b>IMPROVING THE EFFICIENCY OF CONCRETE PROPERTIES USING MODIFIER DMIXTURES</b> <i>Abd Alvahed F., Krivoborodov Yu.R.</i>	<b>475</b>
<b>EFFECT OF MINERAL ADDITIVES ON THE NEUTRALIZATION OF THE ALKALI-SILICA REACTION</b>	<b>485</b>

## IV Всероссийская научная конференция «Строительное материаловедение: настоящее и будущее»

### IV All-Russian Scientific Conference "Construction Materials Science: Present and Future"



13-14 ноября в НИУ МГСУ прошла IV Всероссийская научная конференция «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», организованное кафедрой строительного материаловедения. Событие собрало представителей научного сообщества из различных городов нашей страны: Белгорода, Владимира, Воронежа, Казани, Калининград, Макеевки, Москвы, Новосибирска, Ростова-на-Дону, Самары, Санкт-Петербурга, Симферополя, Твери, Улан-Удэ и Челябинска.

В программе мероприятия, проходящего каждые два года, в этот раз приняли участие более 150 участников из 30 образовательных, научных и производственных организаций. Участниками из 15 городов России в течение двух насыщенных дней было представлено более 70 результатов научной деятельности. Новшеством текущей конференции события стал постерный формат участия для молодых ученых.

On November 13-14, the IV All-Russian Scientific Conference "Construction Materials Science: Present and Future" was held at the National Research University Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), organized by the Department of Construction Materials Science. The event brought together representatives of the scientific community from various cities across our country: Belgorod, Vladimir, Voronezh, Kazan, Kaliningrad, Makeyevka, Moscow, Novosibirsk, Rostov-on-Don, Samara, St. Petersburg, Simferopol, Tver, Ulan-Ude, and Chelyabinsk.

The event, which takes place every two years, this time featured more than 150 participants from 30 educational, scientific, and industrial organizations. Participants from 15 Russian cities presented more than 70 scientific results over the course of two intense days. A new feature of the current conference was the poster format for participation by young scientists.



Содержание выступлений было настолько же разнообразно, как география участников, и затрагивало передовые достижения в исследовании и разработке минеральных вяжущих веществ и материалов на их основе, эффективности использования в качестве минеральных добавок для цементных бетонов различного местного

The content of the presentations was as diverse as the geography of the participants, and touched on cutting-edge achievements in the research and development of mineral binders and materials based on them, and the effectiveness of using various local raw materials, including construction, energy, and metallurgical waste, as mineral additives for cement

сырья, включая отходы строительства, энергетики и металлургии. Тему вторичного использования техногенных отходов для производства строительных материалов, но в контексте полимеров, затронули представители производственной компании Технониколь - Строительные системы. Любопытным представился взгляд этой производственной компании на нестандартные методы испытаний кровельных материалов. Коллеги, в частности, поделились опытом использования устройства собственной разработки для моделирования воздействия человека (имитация обуви) на покрытие плоской кровли.



Технология утилизации пищевого каучука (жвачки) для производства органических материалов также продемонстрировала необычный набор эксплуатационных качеств, а именно аромата (ягодного или фруктового), который они приобретают в зависимости от вида отхода.

Живой дискуссией можно отметить тему самовосстанавливающихся асфальтобетонов, о структурных особенностях капсул с модификатором, для которых поделились коллеги из НИУ МГСУ. Особый интерес вызвали результаты исследований ученых из Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, посвященные принудительной карбонизацией бесцементных материалов с возможностью достижения прочности более 100 МПа.

Каждый из выступающих смог не только поделиться своими результатами текущих исследований и познакомиться с последними наработками коллег, что является ключевой целью прошедшей конференции. Участники отметили важность обмена опытом и договорились о дальнейшей кооперации.

**Модератор конференции, д.т.н., доцент кафедры  
Строительного материаловедения  
НИУ МГСУ,  
Иноземцев А.С.**

**Conference moderator, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
of the Department of Construction Materials Science  
at the National Research University Moscow State University  
of Civil Engineering,  
A.S. Inozemtsev**

concrete. Representatives of Technicol - Construction Systems touched on the topic of recycling industrial waste for the production of building materials, but in the context of polymers. In particular, colleagues shared their experience using a device of their own design to simulate human impact (imitation footwear) on a flat roof covering. The technology of recycling food-grade rubber (chewing gum) to produce organic materials has also demonstrated an unusual set of performance properties, namely the aroma (berry or fruity), which they acquire depending on the type of waste.



The topic of self-healing asphalt concrete was a lively discussion, with colleagues from NRU MGSU sharing the structural features of capsules containing a modifier. Of particular interest were the results of research conducted by scientists from the Vernadsky Crimean Federal University, dedicated to the forced carbonization of cementless materials with the potential to achieve strengths exceeding 100 MPa.

Each speaker was able to not only share their current research results but also learn about the latest developments of their colleagues, which is the key goal of the conference. Participants noted the importance of exchanging experiences and agreed on further cooperation.



## К 95-летию со дня рождения ЮРИЯ МИХАЙЛОВИЧА БАЖЕНОВА



**Юрий Михайлович Баженов (1930 – 2020)**

25 марта 2025 г. исполнилось бы 95 лет заслуженному деятелю науки Российской Федерации, академику Российской академии архитектуры и строительных наук и Международной инженерной академии, лауреату премий Совета Министров СССР и Правительства Российской Федерации доктору технических наук, профессору **Юрию Михайловичу Баженову**.

Ю. М. Баженов прошел большой путь от прораба до руководителя крупных научных и учебных коллективов. После окончания в 1954 г. Военно-инженерной академии им. В. В. Куйбышева он был направлен на стройки Северного флота. В 1960–1970-е годы служил в Военно-инженерной академии на различных научных и педагогических должностях. В 1960 г. защитил кандидатскую, а в 1965 г. – докторскую диссертацию. В эти годы им был выполнен цикл работ по технологии бетонов специального назначения, поведению бетонов при различных видах теплового удара, динамического и газодинамического воздействия, технологии мелкозернистого, высокопрочного и быстротвердеющего бетонов, композиционных, полимерных и других материалов для специального строительства. Результаты этих работ были использованы при возведении объектов различного назначения.

С 1975 г. Ю. М. Баженов возглавлял кафедру технологии вяжущих веществ и бетонов Московского государственного строительного университета (в то время МИСИ). На кафедре были созданы две научно-исследовательские лаборатории, филиалы в ведущих научно-исследовательских институтах и организациях, одновременно проходили подготовку более 30 аспирантов и большое количество инженеров-исследователей. Будучи первым директором Центрального межведомственного

института повышения квалификации руководящих работников и специалистов строительства, Юрий Михайлович внес большой вклад в послевузовское обучение специалистов отрасли.

Работая в МГСУ, Ю. М. Баженов активно руководил созданием новых видов бетонов, получения новых уникальных свойств этих материалов, развивал теорию проектирования бетона с применением математических методов. Он один из авторов технологии вяжущих веществ низкой водопотребности и бетонов на их основе. Широкое признание имеют разработанные им современные методы испытания бетонов.

Ю.М. Баженовым опубликовано более 400 печатных научных трудов, среди которых такие широко используемые в учебном процессе строительных вузов учебники и учебные пособия, как «Строительные материалы», «Технология бетонных и железобетонных изделий», «Технология бетона» (издавался пять раз), «Технология бетона, строительных изделий и конструкций» (издавался трижды), «Мелкозернистые бетоны», «Бетонведение» и др. Ю.М. Баженов является автором 60 изобретений и 28 монографий. Под его научным руководством было подготовлено 18 докторов и 82 кандидата технических наук.

Ю.М. Баженов был награжден орденами «Знак Почёта» и «Инженерная слава», одиннадцатью медалями, многими почётными грамотами и знаками, являлся председателем специализированного диссертационного совета НИУ МГСУ по строительным материалам, изделиям и строительному материаловедению, президентом Международной ассоциации учёных и специалистов в области строительных материалов, вице-президентом РНТО строителей, Почётным членом Российской инженерной академии, Почётным профессором МГСУ и Белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова, Почётным доктором Веймарской высшей школы по архитектуре и строительству (Германия), Почётным строителем России, Москвы и Московской области, был членом редколлегий ведущих отечественных журналов по строительству и строительному материаловедению.

*Коллектив ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,*

*Редакция журнала «Техника и технология силикатов»*

УДК 666.949

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 81.09.00

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN eldefm

DOI 10.62980/2076-0655-2026-413-421

## **РАСШИРЕНИЕ ЦЕМЕНТА, СВЯЗАННОЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ЭТТРИНГИТА**

**Трунтов Н.С.<sup>1</sup>, Шукшин Ф.Б.<sup>1</sup>, Самченко С.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет**

---

### **АННОТАЦИЯ**

*Возрастающий интерес к цементам на основе сульфоалюминатных и сульфоалюмоферритных клинкеров, полученных при более низких температурах, чем портландцементный клинкер, обуславливает необходимость изучения процессов гидратации цементов на их основе. При этом особый интерес вызывает поведение этих цементов при различных режимах твердения и установление продуктов их гидратации, а в частности этtringита и железозамещенного этtringита. Целью данного исследования было изучение кинетики образования этtringита из сульфоалюмината кальция и сульфоалюмоферрита кальция при различных условиях твердения, таких как вода, влажный и сухой воздух, а также установление количества образующегося этtringита и степени расширения образцов. Показано, что образцы, затвердевающие под водой гидратируются быстрее, чем образцы, затвердевающие на влажном воздухе. При этом разница в количестве образовавшегося этtringита не слишком велика. Напротив, процесс гидратации в испытательных образцах, твердевших в сухом воздухе, практически остановился в течение нескольких дней из-за потери значительной части свободной воды в этих условиях. Установлено, что кинетика образования этtringита в исследованных образцах из сульфоалюмоферрита кальция в условиях твердения во влажном воздухе и воде, заметно медленнее, чем при гидратации сульфоалюмината кальция. Пониженное расширение паст из сульфоалюмоферрита кальция обусловлено медленным образованием этtringита при твердении. Сравнение расширения образцов, происходящего во влажном воздухе и в воде, показало, что при одинаковых количествах этtringита расширение больше у образцов, твердевших в воде, что обусловлено повышенным водопоглощением в этих условиях. Таким образом, установлено, что степень расширения, связанного с этtringитом, зависит от условий твердения.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *этtringит, железозамещенный этtringит, сульфоалюминат кальция, сульфоалюмоферритный клинкер, кинетика образования этtringита, гидратация, расширение, условия твердения в воде, во влажном и сухом воздухе.*

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Трунтов Н.С., Шукшин Ф.Б., Самченко С.В. Расширение цемента, связанное с образованием этtringита // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 413-421. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-413-421>, EDN eldefm.

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN eldefm

DOI 10.62980/2076-0655-2026-413-421

## **CEMENT EXPANSION ASSOCIATED WITH ETTRINGITE FORMATION**

**Truntov N.S.<sup>1</sup>, Shukshin F.B.<sup>1</sup>, Samchenko S.V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University**

---

### **ABSTRACT**

*Interest in cements based on sulfoaluminate and sulfoaluminoferrite clinkers is growing. These clinkers are produced at lower temperatures than Portland cement clinker, which reduces their carbon footprint. Therefore, there is a need to study the hydration processes of cements based on them. Of particular interest is the behavior of these cements under various hardening conditions and the identification of their hydration products, in particular ettringite and iron-substituted ettringite. The aim of this study was to investigate the kinetics of ettringite formation from calcium sulfoaluminate and calcium sulfoaluminoferrite under different curing conditions such as water, humid and dry air. The amount of ettringite formed and the degree of expansion of the samples were also studied. It has been shown that samples hardening under water hydrate faster than samples hardening in humid air. However, the difference in the amount of ettringite formed is not too great. In contrast, the hydration process in testing samples cured in dry air virtually stopped within a few days. This is due to the loss of a significant portion of free water under these conditions. It was established that the kinetics of ettringite formation in the studied calcium sulfoaluminoferrite samples under conditions of hardening in humid air and water is noticeably slower than during the hydration of calcium sulfoaluminate. The reduced expansion of calcium sulfoaluminoferrite pastes is due to the slow formation of ettringite during hardening. A comparison of the expansion of samples occurring in humid air and in water showed that, with the same amounts of ettringite, the expansion is greater in samples hardened in water, which is due to increased water absorption under these conditions. Thus, it was established that the degree of expansion associated with ettringite depends on the curing conditions of the samples.*

**KEY WORDS:** *ettringite, iron-substituted ettringite, calcium sulfoaluminate, sulfoaluminoferrite clinker, kinetics of ettringite formation, hydration, expansion, hardening conditions in water, in humid and dry air.*

**FOR CITATION:** Truntov N.S., Shukshin F.B., Samchenko S.V. Cement expansion associated with ettringite formation // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 413 – 421. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-413-421>, EDN eldefm.

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие потребности применения специальных цементов обуславливают необходимость разработки новых видов цементов, сочетающих в себе преимущества существующих специальных цементов. Ограниченность сырьевой базы для производства расширяющихся и напрягающих цементов обусловила необходимость разработки новых составов расширяющихся компонентов и технологий их получения. В этом плане перспективны сульфатированные минералы [1-4]. Известны сульфоалюминат и сульфоферрит кальция, имеющие свои специфические свойства, сочетая которые можно получить цементы с новыми, заранее заданными свойствами. Все эти свойства сочетают в себе сульфоалюмоферриты кальция [5,6].

Сульфоалюминатный клинкер получают обжигом при температурах 1250 – 1350°C сырьевой смеси, состоящей из известняка, глиноземсодержащего компонента и гипса. Температура обжига определяется в зависимости от вида глиноземсодержащего сырья, в качестве которого могут выступать дефицитные бокситы или промышленные отходы. Фазовый состав сульфоалюминатного клинкера представлен сульфоалюминатом кальция (йелимит), белитом, алюмоферритами кальция и другими второстепенными минералами [6,7].

Сульфоалюмоферритный клинкер получают обжигом при температуре 1300°C сырьевой смеси, состоящей из известняка, глинозема и железосодержащих отходов промышленности и гипса. Фазовый состав клинкера представлен алитом, белитом и сульфоалюмоферритами кальция [5].

В настоящее время важной проблемой является уточнение условий формирования и устойчивости этtringита при твердении образцов, содержащих различные алюминатные соединения кальция в своем составе в воде, во влажном и сухом воздухе. Особенно это важно для сухих строительных смесей, так как они наносятся на поверхность бетона тонким слоем или используются в реставрационных работах. Потери значительной части свободной воды в условиях твердения в сухом воздухе может привести к разложению гидратных фаз, снижению прочности цементного камня и его сцепления с поверхностью реставрируемого объекта, и в итоге к снижению долговечности нанесенного слоя смеси [8].

Этtringит является высокосульфатной формой гидросульфоалюмината кальция и содержит до 32 молекул воды ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Этот кристаллогидрат относится к AFt-фазе, представляющей собой твердые растворы или смешанные кристаллы от  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  до  $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  [9,10].

Этtringит образуется при гидратации различных неорганических связующих, в том числе и при гидратации и твердении портландцементов. При этом образуется ограниченное количество этой фазы, которое регулирует сроки схватывания [3]. Однако в некоторых цементах кристаллизуется чрезмерное количество образующегося этtringита, что может вызвать расширение и даже растрескивание затвердевшей пасты [2,6]. Очень часто при коррозионном воздействии на бетон в трещинах можно наблюдать кристаллизацию игольчатых кристаллов этtringита [6,8].

В многочисленных исследованиях, посвященных гидратации алюмоферритов кальция и составу новообразований гидратных фаз, показано, что процесс идет медленнее, чем

## INTRODUCTION

The growing demand for the use of special cements necessitates the development of new types of cements that combine the advantages of existing special cements. The limited raw material base for the production of expanding and stress-straining cements has necessitated the development of new compositions of expanding components and technologies for their production. In this regard, sulfated minerals are promising [1-4]. Calcium sulfoaluminate and calcium sulfoferrite are known, each having its own specific properties, and by combining them it is possible to obtain cements with new, predetermined properties. All these properties are combined in calcium sulfoaluminoferrites [5,6].

Sulfoaluminate clinker is obtained by firing a raw mixture consisting of limestone, an alumina-containing component and gypsum at temperatures of 1250–1350°C. The firing temperature is determined depending on the type of alumina-containing raw material, which may be scarce bauxite or industrial waste. The phase composition of sulfoaluminate clinker is represented by calcium sulfoaluminate (ye-limite), belite, calcium aluminoferrites and other minor minerals [6,7].

Sulfoaluminoferrite clinker is obtained by firing at a temperature of 1300°C a raw mixture consisting of limestone, alumina, iron-containing industrial waste and gypsum. The phase composition of clinker is represented by alite, belite and calcium sulfoaluminoferrites [5].

At present, an important problem is to clarify the conditions of formation and stability of ettringite during the hardening of samples containing various calcium aluminate compounds in their composition in water, in humid and dry air. This is especially important for dry building mixtures, as they are applied to the concrete surface in a thin layer or used in restoration work. The loss of a significant portion of free water during hardening in dry air can lead to the decomposition of hydrated phases, a decrease in the strength of the cement stone and its adhesion to the surface of the restored object, and ultimately to a decrease in the durability of the applied layer of the mixture [8].

Ettringite is a highly sulfated form of calcium hydrosulfoaluminate and contains up to 32 water molecules ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). This crystal hydrate belongs to the AFt phase, which is a solid solution or mixed crystals from  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  to  $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  [9,10].

Ettringite is formed during the hydration of various inorganic binders, including the hydration and hardening of portland cements. In this case, a limited amount of this phase is formed, which regulates the setting time [3]. However, in some cements, excessive amounts of the resulting ettringite crystallize, which can cause expansion and even cracking of the hardened paste [2,6]. Very often, during corrosive action on concrete, crystallization of needle-shaped ettringite crystals can be observed in cracks [6,8].

Numerous studies devoted to the hydration of calcium aluminoferrites and the composition of newly formed hydrated phases have shown that the process is slower than the hydration process of calcium aluminates, but much more

процесс гидратации алюминатов кальция, но гораздо более сложно [11-14]. Мнения исследователей относительно гидравлической активности алюмоферритных фаз сводятся к тому, что гидратационная активность в ряду твердых растворов алюмоферритов кальция снижается с увеличением содержания  $Fe_2O_3$  [5,11,13], а относительно продуктов гидратации алюмоферритов кальция в присутствии гипса, мнения весьма противоречивы [14].

Образование железозамещенного этtringита при гидратации сульфоалюмоферритов на основе  $C_4AF$  наблюдается в первые сутки гидратации. Причем в первые часы (1-12 часов) образуется моносulfатная форма гидросульфоалюмоферрита кальция. Гексагональные гидроалюмоферриты кальция состава  $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$  наблюдаются в сутки и во все последующие сроки, а зародыши кубических гидроалюмоферритов  $C_3(A_xF_{1-x})H_6$  образуются в 28 суток, при этом количество, образовавшегося в первые сутки гидроалюмоферрита состава  $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$ , остается неизменным [9,14].

Известно, что образование этtringита происходит с увеличением объема в 3 раза от первоначального. Это свойство было использовано для создания расширяющихся и напрягающих цементов, в основе которых лежало расширение цементного камня, основанное на образовании этtringита. В некоторых расширяющихся цементах образование этtringита используется для создания требуемых расширяющих напряжений [5,6,8,15,16].

Затвердевшая цементная паста постоянно претерпевает изменения под действием ряда факторов и в большей степени от действия влаги, что вызывает изменения в структуре и составе материалов, и может приводить к их разрушению, изменению внешнего вида. Поэтому актуальным является изучение влияния условий образования гидратных фаз в различных условиях и их устойчивость.

Особенно это относится к сухим строительным смесям, так как во многих сухих строительных смесях в составе вяжущего применяются расширяющиеся компоненты алюминатного и сульфоалюминатного твердения, при гидратации которых образуется этtringит, морфология которого существенно зависит от вида исходного клинкерного минерала, а также от условий образования [9,16,17].

**Целью данного исследования** было изучение кинетики образования этtringита из сульфоалюмината кальция и сульфоалюмоферрита кальция при различных условиях твердения, таких как вода, влажный и сухой воздух, а также установление количества образующегося этtringита и степени расширения образцов.

#### **Материалы и методы исследований**

В работе использовался сульфоалюминатный цемент минералогический состав, которого представлен, белитом ( $C_2S$ ) – 37 %, сульфоалюминатом кальция ( $C_4A_3\dot{S}$ ) – 56% и прочие составляющие 7 %. Химический состав цемента представлен в таблице 1.

В качестве исходных материалов в работе использовался сульфоалюмоферритный клинкер (САФК), выпущенный на Подольском цементном заводе. Химический состав и минералогический состав САФК клинкера представлен в табл. 2.

complex [11-14]. The opinions of researchers regarding the hydraulic activity of aluminoferrite phases boil down to the fact that the hydration activity in a series of solid solutions of calcium aluminoferrites decreases with an increase in the content of  $Fe_2O_3$  [5,11,13], and regarding the hydration products of calcium aluminoferrites in the presence of gypsum, the opinions are very contradictory [14].

The formation of iron-substituted ettringite during the hydration of sulfoaluminoferrites based on  $C_4AF$  is observed in the first day of hydration. Moreover, in the first hours (1-12 hours) the monosulfate form of calcium hydrosulfoaluminoferrite is formed. Hexagonal calcium hydroaluminoferrites of the composition  $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$  are observed in 24 hours and at all subsequent times, and the nuclei of cubic hydroaluminoferrites  $C_3(A_xF_{1-x})H_6$  are formed in 28 days, while the amount of hydroaluminoferrites of the composition  $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$  formed in the first day remains unchanged [9,14].

It is known that the formation of ettringite occurs with an increase in volume by 3 times from the original. This property was used to create expansive and stress-resistant cements, which were based on the expansion of cement stone, based on the formation of ettringite. In some expansive cements, the formation of ettringite is used to create the required expansive stresses [5,6,8,15,16].

Hardened cement paste is constantly subject to change under the influence of a number of factors, and to a greater extent, moisture, which causes changes in the structure and composition of materials and can lead to their destruction and changes in appearance. Therefore, it is relevant to study the influence of the conditions of formation of hydrate phases under various conditions and their stability.

This is especially true for dry building mixtures, since in many dry building mixtures, expanding components of aluminate and sulfoaluminate hardening are used in the binder composition, the hydration of which forms ettringite, the morphology of which significantly depends on the type of the original clinker mineral, as well as on the conditions of formation [9,16,17].

**The aim of this study** was to investigate the kinetics of ettringite formation from calcium sulfoaluminate and calcium sulfoaluminoferrite under different curing conditions such as water, humid and dry air, and to determine the amount of ettringite formed and the degree of expansion of the samples.

#### **Materials and research methods**

The work used sulfoaluminate cement, the mineralogical composition of which is represented by belite ( $C_2S$ ) – 37%, calcium sulfoaluminate ( $C_4A_3\dot{S}$ ) – 56% and other components – 7%. The chemical composition of the cement is presented in Table 1.

The starting materials used in the work were sulfoaluminoferrite clinker (SAFC) produced at the Podolsk cement plant. The chemical composition and mineralogical composition of SAFC clinker are presented in Table 2.

**ТАБЛИЦА 1 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО ЦЕМЕНТА**  
**Table 1 Chemical composition of sulfoaluminate cement**

Материал Material	Содержание оксидов, % Oxide content, %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	ппп
Сульфоалюминатный цемент Sulfoaluminate cement	12,77	14,73	3,20	51,45	1,76	10,45	1,14	2,70
ппп – потери при прокаливании ignition losses								

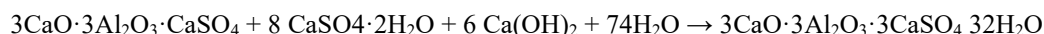
**ТАБЛИЦА 2 ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ САФК КЛИНКЕРА**  
**Table 2 Chemical and mineralogical composition of SAFC clinker**

Содержание оксидов, масс.% Oxide content, wt. %		Содержание минералов, % Mineral content, %	
SiO <sub>2</sub>	14,76	Сульфоалюмоферритная фаза Sulfoaluminoferrite phase	55-60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,87		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,78		
CaO	56,39	Алит Alit	10-15
MgO	2,04	Белит Belit	25-30
SO <sub>3</sub>	2,39		
R <sub>2</sub> O	1,09		
ппп	0,51		

Цемент на основе сульфоалюмоферритного клинкера и гипса в количестве 10 масс.% получали совместным помолом до удельной поверхности 350 м<sup>2</sup>/кг.

Цементная паста из сульфоалюминатного или сульфоалюмоферритного цемента готовилась при водоцементном отношении 0,40. Из цементной пасты формовали образцы для испытаний размером 10 x 10x 30 мм. После схватывания и извлечения из формы они хранились до испытаний при температуре 20 °С в сухом воздухе в эксикаторе над силикагелем, в воздухе, насыщенном водяным паром, и в воде, насыщенной известью.

При твердении образцов в процессе гидратации протекала следующая химическая реакция:



Изменение геометрических размеров и массы образцов определялись после различного времени гидратации или до тех пор, пока они не распались из-за чрезмерного расширения. Гидратацию образцов останавливали, выдерживая образцы в ацетоне, после чего сушили на воздухе. Количество образовавшегося этtringита определяли методом дифференциального термического анализа (ДТА).

### Результаты и обсуждение

Данные о расширении (средние значения трех образцов для испытаний) для паст, изготовленных с использованием C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S̄ представлены на рис. 1.

Сравнение результатов, полученных на испытательных образцах, которые твердели в воде, показывает большие различия как в отношении кинетики процесса расширения, так и общего расширения. Образцы очень быстро расширились и распались менее чем за 1 месяц из-за чрезмерного расширения. Образцы, твердевшие во влажном воздухе, расширяются так же, как твердеющие в воде, но медленнее. Все образцы для испытаний распались менее чем за 1 год из-за чрезмерного расширения.

Образцы, твердевшие в сухом воздухе, показали отчетливое, хотя и меньшее расширение.

Cement based on sulfoaluminoferrite clinker and gypsum in an amount of 10% by weight was obtained by joint grinding to a specific surface area of 350 м<sup>2</sup>/kg.

Cement paste from sulfoaluminate or sulfoaluminoferrite cement was prepared with a water-cement ratio of 0.40. Testing samples measuring 10 x 10 x 30 mm were formed from cement paste. After setting and removal from the mould, they were stored until testing at a temperature of 20 °C in dry air in a desiccator over silica gel, in air saturated with water vapour, and in water saturated with lime.

During the hardening of the samples during the hydration process, the following chemical reaction took place:

The changes in geometric dimensions and mass of the samples were determined after different hydration times or until they disintegrated due to excessive expansion. Hydration of the samples was stopped by soaking them in acetone and then air-drying. The amount of ettringite formed was determined by differential thermal analysis (DTA).

### Results and discussion

Expansion data (average values of three testing samples) for pastes made using C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S̄ are shown in Fig. 1.

Comparison of the results obtained on testing samples that were cured in water shows large differences both in terms of the kinetics of the expansion process and the overall expansion. The samples expanded very rapidly and disintegrated in less than 1 month due to overexpansion.

The samples hardened in moist air expand in the same way as those hardened in water, but more slowly. All testing samples fell to pieces in less than 1 year due to excessive expansion.

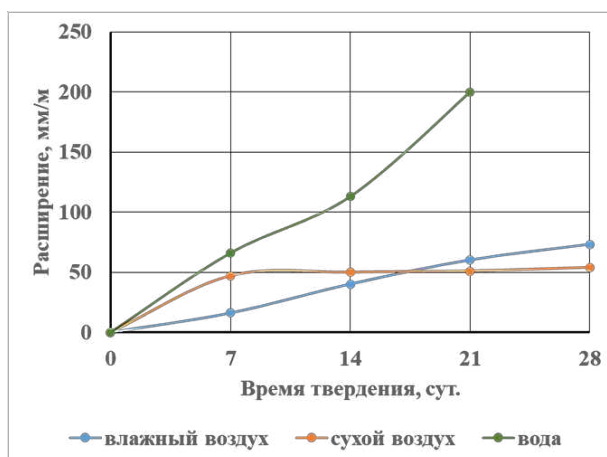
Samples cured in dry air showed a distinct, albeit smaller, expansion.

**РИСУНОК 1**

**РАСШИРЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ  $C_4A_3\dot{S}$ ,  
твёрдевших в воде, во влажном и сухом воздухе**

**Figure 1**

**Expansion of water-cured  $C_4A_3\dot{S}$  samples in humid and dry air**



Степень расширения образцов из сульфоалюмоферрита кальция представлены на рис.2.

Как видно из представленных данных образцы расширялись медленно, и заметное трещинообразование стало очевидным только через 12 месяцев.

The degree of expansion of calcium sulfoaluminoferrite samples is shown in Fig. 2.

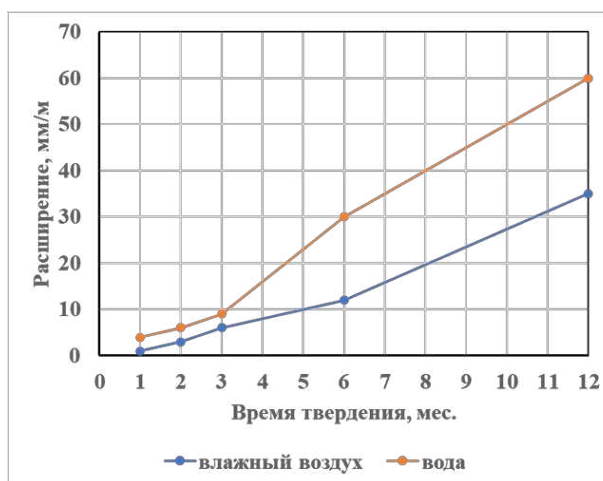
As seen from the presented data, the samples expanded slowly, and noticeable cracking became evident only after 12 months.

**РИСУНОК 2**

**КИНЕТИКА РАСШИРЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ  
СУЛЬФОАЛЮМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ**

**Figure 2**

**Kinetics of expansion of calcium sulfoaluminoferrite samples**



Изучение кинетики образования этtringита в исследованных образцах из сульфоалюмината кальция, твердевших в условиях влажного воздуха и воды показало, что этtringит образуется очень быстро в течении первых 7 суток. В следующие 14 сут вплоть до 21 сут образование этtringита продолжается, однако не так интенсивно и к 28 суткам его образование стабилизируется (рис.3).

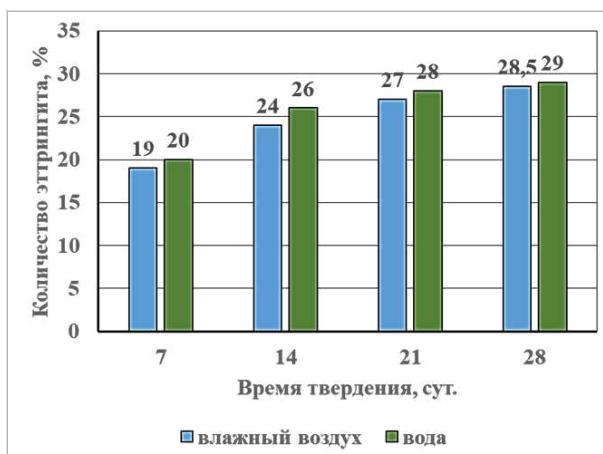
A study of the kinetics of ettringite formation in the studied calcium sulfoaluminate samples, hardened in conditions of humid air and water, showed that ettringite forms very quickly during the first 7 days. In the next 14 days up to the 21st day, the formation of ettringite continues, but not as intensively, and by the 28th day its formation stabilizes (Fig. 3).

**РИСУНОК 3**

**КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ЭТТРИНГИТА В  
ОБРАЗЦАХ ИЗ  $C_4A_3\dot{S}$ , твёрдевших в воде и во  
влажном воздухе**

**Figure 3**

**Kinetics of ettringite formation in  $C_4A_3\dot{S}$  samples hardened in water and moisture air**



Сравнение расширения образцов, происходящих во влажном воздухе и в воде, показало, что при одинаковых уровнях этtringита расширение было больше у образцов, твердевших в воде (рис.4). Можно заключить, что повышенное водопоглощение в этих условиях стимулирует расширение затвердевшей пасты. Поскольку расширение в обоих условиях сопровождалось поглощением воды из окружающей среды, представляется вероятным, что в процессе расширения происходили явления набухания.

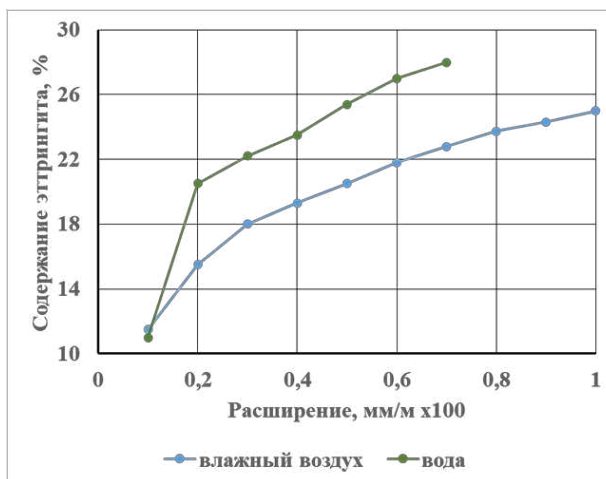
A comparison of the expansion of samples occurring in humid air and in water showed that, at the same levels of ettringite, the expansion was greater in samples hardened in water (Fig. 4). It can be concluded that increased water absorption under these conditions stimulates the expansion of the hardened paste. Since the expansion in both conditions was accompanied by the absorption of water from the surrounding medium, it seems likely that swelling phenomena occurred during the expansion process.

**РИСУНОК 4**

**РАСШИРЕНИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ ЭТТРИНГИТА В ОБРАЗЦАХ ИЗ  $C_4A_3\bar{S}$ , ТВЕРДЕВШИХ В ВОДЕ И ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ**

Figure 4

Expansion as a function of ettringite formation in  $C_4A_3\bar{S}$  samples hardened in water and moisture air



На рис.5 показана кинетика образования этtringита в исследованных образцах из сульфалоумоферрита кальция в условиях твердения во влажном воздухе и воде. Реакция образования этtringита заметно медленнее, чем при гидратации сульфалоумината кальция.

Figure 5 shows the kinetics of ettringite formation in the studied calcium sulfoaluminoferrite samples under hardening conditions in humid air and water. The reaction of ettringite formation is noticeably slower than during the hydration of calcium sulfoaluminate.

Изучение расширения исследуемых паст из сульфалоумоферрита кальция в зависимости от количества образовавшегося этtringита показало, что способность этtringита вызывать расширение для получения заданной степени расширения в пастах, твердеющих в воде и на влажном воздухе требуется разные количества этtringита. Пониженное расширение паст объясняется медленным образованием этtringита при твердении сульфалоумоферрита кальция (рис.6).

A study of the expansion of the investigated pastes made of calcium sulfoaluminoferrite depending on the amount of ettringite formed showed that the ability of ettringite to cause expansion to obtain a given degree of expansion in pastes hardening in water and in humid air requires different amounts of ettringite. The reduced expansion of the pastes is explained by the slow formation of ettringite during the hardening of calcium sulfoaluminoferrite (Fig. 6).

**РИСУНОК 5**

**КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ЭТТРИНГИТА ПРИ ГИДРАТАЦИИ СУЛЬФОАЛУМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ**

Figure 5

Kinetics of ettringite formation during hydration of calcium sulfoaluminoferrite

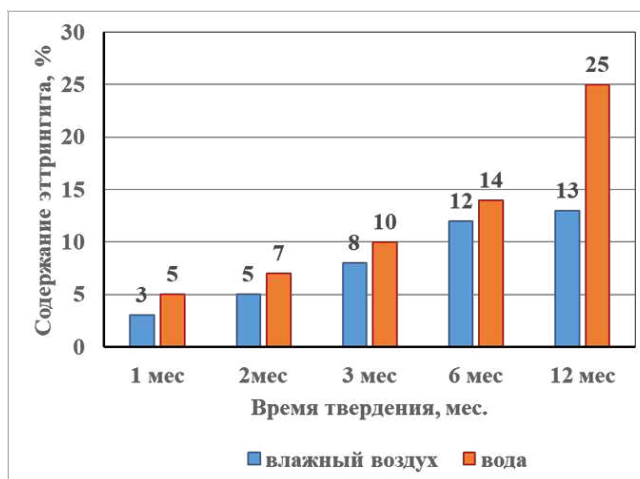
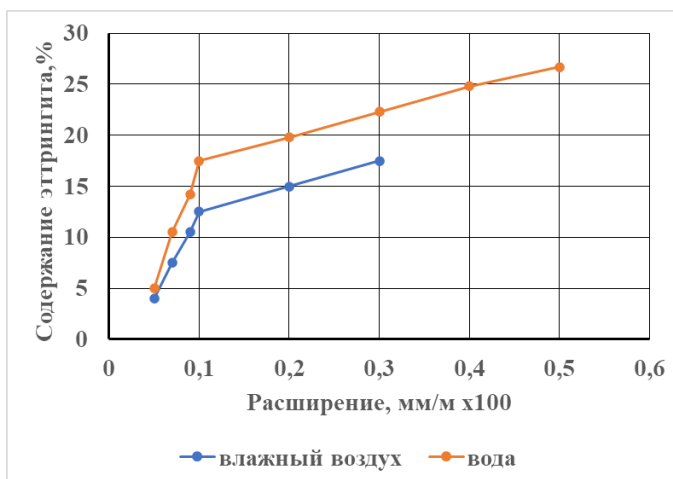


РИСУНОК 6

РАСШИРЕНИЕ ОБРАЗЦОВ СУЛЬФО-АЛЮМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ ЭТТРИНГИТА, твердевших в воде и во влажном воздухе

Figure 6

Expansion of calcium sulfoalumoferrite samples depending on the amount of ettringite formed, hardened in water and in humid air



Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что степень расширения, связанного с этtringитом, зависит от условий твердения образцов. Показано, что образцы, затвердевающие под водой гидратируются быстрее, чем образцы, затвердевающие на влажном воздухе. При этом разница в количестве образовавшегося этtringита не слишком велика.

2. Процесс гидратации в испытательных образцах, твердевших в сухом воздухе, практически остановился в течение нескольких дней. Это обусловлено потерей значительной части свободной воды в этих условиях.

3. Изучение образования этtringита в образцах из сульфоалюмината кальция, твердевших в условиях влажного воздуха и воды показало, что этtringит образуется очень быстро в течении первых 7 суток. В следующие 14 сут вплоть до 21 сут образование этtringита продолжается, однако не так интенсивно и к 28 суткам его образование стабилизируется.

4. Этtringит при гидратации сульфоалюмоферрита кальция образуется медленнее и в меньшем количестве, что обуславливает небольшое расширение образцов.

5. Сравнение расширения образцов как из сульфоалюмината кальция, так и из сульфоалюмоферрита кальция, происходящего во влажном воздухе и в воде, показало, что при одинаковых количествах этtringита расширение больше у образцов, твердевших в воде, что обусловлено повышенным водопоглощением в этих условиях.

Литература:

1. Кривобородов, Ю. Р. Физико-химические свойства сульфатированных клинкеров: Аналитический обзор / Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: ВНИИЭСМ, 1991. – 55 с. – (Цементная промышленность; Выпуск 2). – EDN TSRXOD.  
 2. Кузнецова, Т. В. Химия, состав и свойства специальных цементов / Т. В. Кузнецова, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий : материалы научно-практической конференции, Томск, 03–04 октября 2000 года / Томский политехнический университет (ТПУ). Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2000. – С. 96–98. – EDN TOEXOZ.  
 3. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его

Conclusion

As a result of the research conducted, the following conclusions can be drawn:

1. It was found that the degree of expansion associated with ettringite depends on the curing conditions of the samples. It has been shown that samples hardening under water hydrate faster than samples hardening in humid air. However, the difference in the amount of ettringite formed is not too great.

2. The hydration process in test samples cured in dry air practically stopped within a few days. This is due to the loss of a significant portion of free water under these conditions.

3. A study of the formation of ettringite in calcium sulfoaluminate samples hardened in humid air and water showed that ettringite forms very quickly within the first 7 days. In the next 14 days up to the 21st day, the formation of ettringite continues, but not as intensively, and by the 28th day its formation stabilizes.

4. During the hydration of calcium sulfoalumoferrite, ettringite is formed more slowly and in smaller quantities, which causes a slight expansion of the samples.

5. A comparison of the expansion of both calcium sulfoaluminate and calcium sulfoalumoferrite samples in humid air and in water showed that, with the same amounts of ettringite, the expansion was greater in samples hardened in water, which was due to increased water absorption under these conditions.

References

1 Krivoborodov, Yu. R. Physicochemical Properties of Sulfated Clinkers: Analytical Review / Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. - Moscow: VNIIESM, 1991. - 55 p. - (Cement Industry; Issue 2). - EDN TSRXOD.  
 2. Kuznetsova, T. V. Chemistry, composition and properties of special cements / T. V. Kuznetsova, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko // Chemistry and chemical technology at the turn of the millennium: materials of the scientific and practical conference, Tomsk, October 3–4, 2000 / Tomsk Polytechnic University (TPU). Vol. 1. – Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2000. – P. 96–98. – EDN TOEXOZ.  
 3. Gusev, B. V. Technology of Portland cement and its varieties: Textbook / B. V. Gusev, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. - Moscow: Moscow State University of Civil

- разновидностей: Учебное пособие / Б. В. Гусев, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, 2016. – 113 с. – ISBN 978-5-7264-1230-6. – EDN XMA YRX.
4. Samchenko, S. V. Minerals of expansive and non-shrinkage sulfomineral cements / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, Y. R. Krivoborodov // MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg, 15–17 ноября 2016 года. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 03006. – <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710603006> . – EDN XMQTMT.
5. Самченко, С. В. Сульфатированные алюмоферриты кальция и цементы на их основе / С. В. Самченко; Федер. агентство по образованию, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Изд. центр. – Москва: Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, 2004. – 120 с. – EDN QNDUNJ.
6. Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфалоуминатные цементы / Т. В. Кузнецова. – Москва: Стройиздат, 1986. – 208 с. – EDN YRNAYL.
7. Мин, Х. Х. Кинетика минералообразования при синтезе сульфалоуминатного клинкера / Х. Х. Мин, Е. Н. Потапова, И. Ю. Бурлов // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 3(252). – С. 106-108. – EDN LUWMCW.
8. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.
9. Самченко, С. В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов / С. В. Самченко; Федер. агентство по образованию, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Издат. центр. – Москва: Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева, 2005. – 154 с. – ISBN 5-7237-0514-0. – EDN QNDVZV.
10. Анализ структурно-фазового состояния моноалюмината кальция / Ю. А. Абзаев, Ю. С. Саркисов, Т. В. Кузнецова [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 3(47). – С. 56-62. – <https://doi.org/10.5862/MCE.47.6> . – EDN SBZAHX.
11. Шпынова Л.Г., Саницкий М.А. Гидратационная активность ферритов и алюмоферритов кальция. // Укр.хим.ж.-1983.-49.-11. С.1138-1142.
12. Scrivener Karen L., Pratt P.L. Microstructure studies of the hydration of C3A and C4AF independently and in Cement paste // Proc. Brit. Ceram. Soc. -1984, - №35, - p.207-219.
13. Masauoshi A., Kiyoshi A., Masaki D., Minoru P., Akira D. Hydration products from calcium aluminoferrite Solid solution // Review 37 Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. - 1983, p.37-39.
14. Samchenko, S. V. Features of the formation of crystalline hydrosulfoaluminates during hydration of stoichiometric mixtures of calcium aluminates with calcium sulfate / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 393. – P. 132102. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132102> . – EDN CRATKC.
15. Ogawa K., Roy D. M. C4A3S hydration ettringite formation, and its expansion mechanism: I. expansion; Ettringite stability //Cement and Concrete Research. – 1981. – Т. 11. – №. 5-6. – С. 741-750.
16. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
17. Samchenko, S. The influence of the different factors on the Engineering, IP R Media, 2016. - 113 p. - ISBN 978-5-7264-1230-6. - EDN XMA YRX.
4. Samchenko, S. V. Minerals of expansive and non-shrinkage sulfomineral cements / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, Y. R. Krivoborodov // MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg, 15–17 ноября 2016 года. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 03006. – <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710603006> . – EDN XMQTMT.
5. Samchenko, S. V. Sulphated calcium aluminoferrites and cements based on them / S. V. Samchenko; Federal Education Agency, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Publishing Center. – Moscow: D. I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, 2004. – 120 p. – EDN QNDUNJ.
6. Kuznetsova, T.V. Aluminate and sulfoaluminate cements / T.V. Kuznetsova. – Moscow: Stroyizdat, 1986. – 208 p. – EDN YRNAYL.
7. Min, H. H. Kinetics of mineral formation during the synthesis of sulfoaluminate clinker / H. H. Min, E. N. Potapova, I. Yu. Burlov // Advances in Chemistry and Chemical Technology. - 2022. - Vol. 36, No. 3 (252). - P. 106-108. - EDN LUWMCW.
8. Samchenko, S. V. Formation and genesis of the structure of cement stone / S. V. Samchenko. - 2nd edition. - Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2020. - 288 p. - ISBN 978-5-7264-2808-6. - EDN KCBIBU.
9. Samchenko, S. V. The role of ettringite in the formation and genesis of the structure of special cements stone / S. V. Samchenko; Samchenko S. V.; Federal Education Agency, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Publishing Center. – Moscow: D. I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, 2005. – 154 p. – ISBN 5-7237-0514-0. – EDN QNDVZV.
10. Analysis of the structural and phase state of calcium monoaluminum / Yu. A. Abzaev, Yu. S. Sarkisov, T. V. Kuznetsova [et al.] // Journal of Civil Engineering. - 2014. - No. 3 (47). - P. 56-62. - <https://doi.org/10.5862/MCE.47.6> - EDN SBZAHX.
11. Shpynova L.G., Sanitsky M.A. Hydration activity of calcium ferrites and aluminoferrites. // Ukr.khim.zh.-1983.-49.-11. P.1138-1142.
12. Scrivener Karen L., Pratt P.L. Microstructure studies of the hydration of C3A and C4AF independently and in Cement paste // Proc. Brit. Ceram. Soc. -1984, - №35, - p.207-219.
13. Masauoshi A., Kiyoshi A., Masaki D., Minoru P., Akira D. Hydration products from calcium aluminoferrite Solid solution // Review 37 Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. - 1983, p.37-39.
14. Samchenko, S. V. Features of the formation of crystalline hydrosulfoaluminates during hydration of stoichiometric mixtures of calcium aluminates with calcium sulfate / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 393. – P. 132102. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132102> . – EDN CRATKC.
15. Ogawa K., Roy D. M. C4A3S hydration ettringite formation, and its expansion mechanism: I. expansion; Ettringite stability //Cement and Concrete Research. – 1981. – Т. 11. – №. 5-6. – С. 741-750.
16. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
17. Samchenko, S. The influence of the different factors on the stability of the AFt and AFm phases / S. Samchenko, E. Makarov // American Concrete Institute, ACI Special Publication, Moscow, 06–07 июня 2018 года. Vol. 326. – Moscow:

stability of the AFt and AFm phases / S. Samchenko, E. Makarov // American Concrete Institute, ACI Special Publication, Moscow, 06–07 июня 2018 года. Vol. 326. – Moscow: American Concrete Institute, 2018. – EDN BTXJRG.

American Concrete Institute, 2018. – EDN BTXJRG.

---

**Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».**  
**The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”**

**Трунтов Никита Сергеевич** – студент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», E-mail: [n\\_truntov@mail.ru](mailto:n_truntov@mail.ru)

**Truntov Nikita Sergeevich** – student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: [n\\_truntov@mail.ru](mailto:n_truntov@mail.ru)

**Шушкин Фотий Борисович** – студент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», E-mail: [robin.dreik@yandex.ru](mailto:robin.dreik@yandex.ru)

**Shukshin Fotiy Borisovich** – student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: [robin.dreik@yandex.ru](mailto:robin.dreik@yandex.ru)

**Самченко Светлана Васильевна** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», E-mail: [SamchenkoSV@mgsu.ru](mailto:SamchenkoSV@mgsu.ru) (автор для связи)

**Samchenko Svetlana Vasilievna** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Construction Materials Science, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”, E-mail: [SamchenkoSV@mgsu.ru](mailto:SamchenkoSV@mgsu.ru) (contact author)

**Вклад авторов:** Трунтов Н.С., Шушкин Ф.Б. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи, Самченко С.В. – идея, научное руководство, редактирование статьи.

**Contribution of the author:** Truntov N.S., Shukshin F.B. – conducting experiments, processing material, writing the article, Samchenko S.V. – idea, scientific supervision, editing the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

УДК 666.9.017

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.35.00

Научная специальность ВАК: 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов  
(технические науки)

EDN tpxhsz

DOI 10.62980/2076-0655-2026-422-433

## РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ШТУКАТУРНОЙ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО ЦЕМЕНТА

Мин Хейн Хтет<sup>1</sup>, Аунг Чжо Чжо<sup>1</sup>, Потапова Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

---

### АННОТАЦИЯ

*В данной работе рассмотрены особенности разработки штукатурных гидроизоляционных смесей с использованием сульфоалюминатного цемента (САЦ). Основное внимание уделялось подбору компонентов, обеспечивающих повышение прочности, водонепроницаемости и надёжного сцепления раствора с основанием. Применение пластифицирующих добавок Melflux 4930 и Melment F-10 способствует интенсификации гидратационных процессов, формированию оптимальной структуры цементного камня и улучшению эксплуатационных свойств. Показано, что регулирование содержания САЦ в композиции позволяет контролировать сроки схватывания и раннюю прочность вяжущего, что особенно важно при выполнении ремонтных и восстановительных работ. Оптимизация состава сухих смесей с фракционированным кварцевым песком и модификаторами способствует повышению долговечности покрытий и сокращению времени строительных операций. Полученные результаты могут быть использованы для разработки эффективных гидроизоляционных составов и совершенствования технологий их применения.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сульфоалюминатный цемент, портландцемент штукатурная гидроизоляция, пластификаторы, ранняя прочность, водонепроницаемость, оптимизация состава

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мин Хейн Хтет, Аунг Чжо Чжо, Потапова Е.Н. Разработка составов штукатурной гидроизоляционной смеси с использованием сульфоалюминатного цемента. // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 422–433. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-422-433>, EDN tpxhsz.

Type of article - scientific article

OECD 2.04 Chemical engineering

II ENGINEERING, CHEMICAL

EDN tpxhsz

DOI 10.62980/2076-0655-2026-422-433

## DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS OF PLASTER WATERPROOFING MIXTURE USING SULFOALUMINATE CEMENT

Min Hein Htet<sup>1</sup>, Aung Kyaw Kyaw<sup>1</sup>, Potapova E.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RSTU)

---

### ABSTRACT

*In this paper, the features of the development of plaster waterproofing mixtures using sufoaluminate cement (SAC) are considered. The main attention was paid to the selection of components that increase the strength, water resistance and reliable adhesion of the mortar to the substrate. The use of plasticizing additives Melflux 4930 and Melment F-10 contributes to the intensification of hydration processes, the formation of the optimal structure of cement stone and the improvement of operational properties. It is shown that the regulation of the CAC content in the composition makes it possible to control the setting time and early strength of the binder, which is especially important when performing repair and restoration work. Optimization of the composition of dry mixes with fractionated quartz sand and modifiers helps to increase the durability of coatings and reduce the time of construction operations. The results obtained can be used to develop effective waterproofing compounds and improve their application technologies.*

**KEY WORDS:** sufoaluminate cement, Portland cement, plaster waterproofing of mixtures, plasticizers, early strength, water resistance, composition optimization

**FOR CITATION:** Min Hein Htet, Aung Kyaw Kyaw, Potapova E.N. Development of plaster waterproofing mix compositions using sulfoaluminate cement // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 422 – 433. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-422-433>, EDN tpxhsz.

## ВВЕДЕНИЕ

Бетонные конструкции подвержены образованию трещин, фрагментации и другим дефектам в процессе длительной эксплуатации. Для ремонта бетонных элементов часто применяются полимерные материалы [1], полимер-модифицированные цементные материалы [2,3], а также цементные материалы. Учитывая долговечность, механические свойства, размерную стабильность, широкую сферу применения, экономическую эффективность и совместимость с цементобетонными материалами, цементные быстротвердеющие ремонтные составы являются наиболее широко исследуемыми и применяемыми.

Обычный портландцемент в настоящее время является наиболее широко производимым вяжущим материалом, обладающим такими преимуществами, как низкая стоимость и широкий спектр применения. Однако в процессе производства обычного портландцемента выделяется углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), на долю которого приходится около 5 – 8% [4] от общего объема глобальных выбросов  $\text{CO}_2$ , что существенно затрудняет достижение целей «углеродного пика» и «углеродной нейтральности». В сравнении с клинкером обычного портландцемента, клинкер сульфоалюминатного цемента требует меньшего расхода известняка при производстве, обжигается при более низких температурах [5-7] и обладает более высокой размольной способностью [8-11].

Сульфоалюминатный цемент (САЦ) характеризуется быстрым схватыванием, высокой ранней прочностью, стабильностью линейных размеров и долговечностью [7,11-13]. Его гидратация протекает значительно быстрее по сравнению с портландцементом (ПЦ) [6, 7, 11, 14-15]. В системе портландцемент-сульфоалюминатный цемент ускоренная гидратация САЦ сопровождается потреблением воды и умеренным повышением температуры, что интенсифицирует общий процесс гидратации. Образующиеся гидраты, в частности этtringит, служат центрами зародышеобразования, активируя гидратацию ПЦ [16-24] и обеспечивая ускоренное схватывание и развитие ранней прочности [25-27].

Составы для гидроизоляции, характеризующиеся высокой плотностью и прочностью цементного камня, изготавливаются на основе портландцемента. Однако данный вяжущий материал отличается увеличенными сроками схватывания и низкой ранней прочностью. В отличие от него, сульфоалюминатный цемент характеризуется коротким сроком схватывания и интенсивным набором прочности в первые сутки твердения. Учитывая различие в свойствах этих вяжущих, можно предположить, что варьирование их соотношения в композиции позволит целенаправленно регулировать характеристики получаемого материала.

Поэтому целью исследования является разработка составов штукатурной гидроизоляционной смеси с использованием сульфоалюминатного цемента.

### Материалы и методы исследования

В работе использованы портландцемент и сульфоалюминатный цемент производства АО «Подольск-Цемент», а также пластифицирующие добавки - гиперпластификатор Melflux 4930 и суперпластификатор Melment F-10.

Нормальную густоту и сроки схватывания цементного теста определяли на малых образцах в соответствии с [28];

## INTRODUCTION

Concrete structures are prone to cracking, fragmentation, and other defects during long-term operation. Polymer materials [1], polymer-modified cement materials [2,3], and cement materials are often used to repair concrete elements. Taking into account durability, mechanical properties, dimensional stability, wide range of applications, economic efficiency and compatibility with cement-concrete materials, cement fast-hardening repair compounds are the most widely researched and used.

Conventional Portland cement is currently the most widely produced binder material, with advantages such as low cost and a wide range of applications. However, in the production process of conventional Portland cement, carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) is released, which accounts for about 5 – 8% [4] of total global  $\text{CO}_2$  emissions, which significantly complicates the achievement of the goals of "carbon peak" and "carbon neutrality". In comparison with the clinker of ordinary Portland cement, the clinker of sulfoaluminate cement requires less limestone consumption during production, burns at lower temperatures [5-7] and has a higher grinding capacity [8-11].

Sulfoaluminate cement (SAC) is characterized by fast setting, high early strength, linear dimensional stability and durability [7,11-13]. Its hydration proceeds much faster compared to Portland cement (PC) [6, 7, 11, 14-15]. In the Portland cement-sulfoaluminate cement system, accelerated hydration of SAC is accompanied by water consumption and a moderate increase in temperature, which intensifies the overall hydration process. The resulting hydrates, in particular ettringite, serve as nucleation centers, activating PC hydration [16-24] and providing accelerated setting and early strength development [25-27].

Waterproofing compounds, characterized by high density and strength of cement stone, are made on the basis of Portland cement. However, this binder is characterized by extended setting times and low early strength. In contrast, sulfoaluminate cement is characterized by a short setting time and intensive strength gain on the first day of hardening. Given the difference in the properties of these binders, it can be assumed that varying their ratio in the composition will make it possible to purposefully adjust the characteristics of the resulting material.

Therefore, the purpose of the study is to develop compositions of plaster waterproofing mixtures using sulfoaluminate cement.

### Materials and methods of research

The work used Portland cement and sulfoaluminate cement produced by Podolsk-Cement JSC, as well as plasticizing additives - Melflux 4930 hyperplasticizer and Melment F-10 superplasticizer.

The normal density and setting time of the cement dough were determined on small samples in accordance with [28]; flexural and compressive strength – on samples of 1x1x3 cm according to [28] and on standard samples 40 x40 x160mm according to GOST 30744-2001<sup>1</sup>

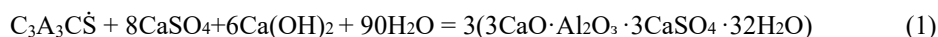
прочность при изгибе и сжатии — на образцах размером 1x1x3 см по [28] и на стандартных образцах 40x40x160мм согласно ГОСТ 30744 – 2001<sup>1</sup>

Вязущее для штукатурной гидроизоляции должно удовлетворять ряду требований, поэтому исследования состава сухой смеси проводили с использованием фракционированного кварцевого песка. Содержание мелкого заполнителя в смеси составляло 50 и 60%.

Для штукатурных гидроизоляционных составов определяли подвижность по распылу конуса, согласно ГОСТ 58277-2018<sup>2</sup> (п.4.4), водоудерживающую способность (п.6), предел прочности на растяжение при изгибе и при сжатии (п.7) образцов-призм размерами 160x40x40 мм.

### Эксперименты и результаты обсуждения

Особенностью композиционного вяжущего на основе сульфоалюминатного цемента и портландцемента является способность минерала  $C_3A_3CS$  взаимодействовать с портландитом, выделяющимся при гидратации силикатной фазы портландцемента. При достаточном содержании сульфата кальция в системе это способствует образованию максимального количества этtringита.



Происходит снижение концентрации ионов кальция в жидкой фазе цементного камня, что интенсифицирует процесс гидратации силикатных фаз портландцемента, а также приводит к снижению значения pH.

Проведено исследование влияния композиционного цемента, в котором содержание САЦ изменялось от 10 до 90% (таблица 1).

**ТАБЛИЦА 1 НОРМАЛЬНАЯ ГУСТОТА И СРОКИ СХВАТЫВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ЦЕМЕНТА**

**Table 1 Normal density and setting time of composite cement**

№	Состав композиционного цемента Composition of the composite of cement	Нормальная густота, % Normal consistency, %	Сроки схватывания, мин Setting time, min	
			начало initial	окончание final
1	100 % САЦ	62,5	25	40
2	90 % САЦ + 10 % ПЦ	55,0	27	50
3	80 % САЦ + 20 % ПЦ	52,5	28	55
4	60 % САЦ + 40 % ПЦ	45,0	29	57
5	50 % САЦ + 50 % ПЦ	45,0	29	59
6	40 % САЦ + 60 % ПЦ	40,0	29	59
7	20 % САЦ + 80 % ПЦ	37,0	29	60
8	10 % САЦ + 90 % ПЦ	36,0	34	60
9	100 % ПЦ	30,0	40	250

Водопотребность портландцемента составляет 30,0%, тогда как для сульфоалюминатного цемента данный показатель достигает 62,5%. Установлено, что увеличение содержания САЦ в композиции приводит к росту нормальной густоты и сокращению сроков схватывания: начало - с 34 до 25 мин, окончание - с 60 до 40 мин. Такой эффект обусловлен интенсивным

The binder for plaster waterproofing must meet a number of requirements, therefore, studies of the composition of the dry mixture were carried out using fractionated quartz sand. The content of fine aggregate in the mixture was 50 and 60%.

For plaster waterproofing compositions, the cone spreading mobility was determined in accordance with GOST 58277 - 2018<sup>2</sup> (clause 4.4), water retention capacity (clause 6), and tensile strength under bending and compression (clause 7) of 160x40x40 mm prism samples.

### Experiments and discussion

A special feature of the composite binder based on sulfoaluminate cement and Portland cement is the ability of the mineral  $C_3A_3CS$  to interact with portlandite released during hydration of the silicate phase of Portland cement. With a sufficient content of calcium sulfate in the system, this contributes to the formation of the maximum amount of ettringite

There is a decrease in the concentration of calcium ions in the liquid phase of cement stone, which intensifies the hydration process of the silicate phases of Portland cement, and also leads to a decrease in pH.

A study was conducted on the effect of composite cement, in which the content of SAC varied from 10 to 90% (table 1).

The water consumption of Portland cement is 30.0%, while for sulfoaluminate cement this indicator reaches 62.5%. It was found that an increase in the SAC content in the composition leads to an increase in normal density and a reduction in setting time: the beginning is from 34 to 25 minutes, the end is from 60 to 40 minutes. This effect is due to the intensive formation of ettringites in the early stages of

<sup>1</sup> ГОСТ 30744 - 2001. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. МНТКС. М.2002.

GOST 30744-2001. Test methods using polyfractional sand. MNTKS. M.2002.

<sup>2</sup> ГОСТ 58277 - 2018. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний - М.: Стандартиформ, 2019 - 21с.  
GOST 58277-2018. Dry construction mixtures based on cement binders. Test methods. Moscow: Standartinform, 2019, 21 p.

образованием этtringита на ранних стадиях гидратации. Регулирование доли САЦ позволяет целенаправленно варьировать сроки схватывания, вяжущего в соответствии с требованиями конкретных областей применения. Для исследования прочностных характеристики композиционного вяжущего были выбраны составы № 2-3 и № 7-8, содержащие 10-20% САЦ в сочетании с портландцементом (табл.2).

hydration. Regulation of the proportion of SAC allows you to purposefully vary the setting time of the binder in accordance with the requirements of specific areas of application. To study the strength characteristics of the composite binder, formulations No. 2-3 and No. 7-8 containing 10-20% CAC in combination with Portland cement were selected (Table 2).

**ТАБЛИЦА 2 ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО**  
**Table 2 Strength characteristics of composite binder**

№№	Состав Composition	Прочность МПа, при твердении, сут, МПа Strength MPa, during hardening, day, MPa							
		при изгибе (in bending)				при сжатии (in compression)			
		1	3	7	28	1	3	7	28
Состав 1	100% САЦ	3,5	5,0	5,7	6,0	28,7	35,8	36,3	39,5
Состав 2	90 % САЦ + 10 % ПЦ	6,0	6,7	7	7,6	27,3	27,8	28,51	31,6
Состав 3	80 % САЦ + 20 % ПЦ	4,4	5,8	6,3	6,7	17,0	19,0	28,7	30,1
Состав 7	20 % САЦ + 80 % ПЦ	3,5	6,3	6,5	7,5	15,5	25,1	38,6	43,4
Состав 8	10 % САЦ + 90 % ПЦ	6,2	7,2	7,4	8,5	20,7	40,5	50,8	56,9

Анализ экспериментальных данных показал, что наибольшая прочность при изгибе на всех сроках твердения достигается в составе с содержанием 10 % САЦ и 90 % ПЦ. В ранние сроки твердения максимальная прочность при сжатии (27,3-28,7 МПа) зафиксирована у составов № 1 и № 2, содержащих 90 и 80 % САЦ соответственно. В 28-суточном возрасте наибольшие значения прочности при сжатии продемонстрировали состав № 7 (43,4 МПа) и состав № 8 (56,9 МПа).

Analysis of experimental data has shown that the highest bending strength at all periods of hardening is achieved in a composition containing 10% SAC and 90% PC. In the early stages of hardening, the maximum compressive strength (27.3-28.7 MPa) was recorded for formulations No. 1 and No. 2 containing 90 and 80% SAC, respectively. At the age of 28 days, composition No. 7 (43.4 MPa) and composition No. 8 (56.9 MPa) demonstrated the highest values of compressive strength.

Таким образом, состав № 8 (10 % САЦ + 90 % ПЦ) характеризуется умеренной водопотребностью (36%), удельно-высокими сроками схватывания (34-60 мин) и высокими прочностными показателями в возрасте 28 сут (изгиб - 8,5 МПа, сжатие - 56,9 МПа). На его основе разработаны составы штукатурных гидроизоляционных смесей.

Thus, composition No. 8 (10% SAC + 90% PC) is characterized by moderate water consumption (36%), satisfactory setting time (34-60 minutes) and high strength indicators at the age of 28 days (bending - 8.5 MPa, compression - 56.9 MPa). Based on it, the compositions of plaster waterproofing mixtures have been developed.

К 28-м суткам твердения композиционного вяжущего (90 % ПЦ и 10 % САЦ) формируется плотная микроструктура цементного камня, где основным фазовым компонентом является гидросиликат кальция (C-S-H), образующий разветвленную волокнистую структуру (рис.1 а, б).

By the 28th day of hardening of the composite binder (90% PC and 10% SAC), a dense microstructure of cement stone is formed, where the main phase component is calcium hydroxylate (C-S-H), which forms a branched fibrous structure (Fig.1 a,b).

Повышенное содержание САЦ способствует интенсивному образованию этtringита ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ), кристаллизующегося в игольчатой или столбчатой форме и локализуящегося в порах и межзерновых зонах (рис. 1 в, г). К 28 суткам твердения отмечается его частичная стабилизация и перераспределение, что ведёт к уплотнению микроструктуры и снижению капиллярной пористости.

The increased content of SAC contributes to the intensive formation of ettringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ), crystallizing in a needle-like or columnar form and localized in pores and intergranular zones (Fig.1 c, d). By the 28th day of hardening, its partial stabilization and redistribution are noted, which leads to a compaction of the microstructure and a decrease in capillary porosity

С целью снижения водопотребности композиционного вяжущего и формирования более плотной структуры цементного камня в систему вводили пластифицирующую добавку Melflux 4930 в количестве 0,1-0,6 % от массы цемента (таблица 3).

In order to reduce the water consumption of the composite binder and form a denser cement stone structure, Melflux 4930 plasticizing additive was introduced into the system in an amount of 0.1-0.6% by weight of cement (table.3).

Введение гиперпластификатора приводит к снижению нормальной густоты цементного теста с 36,0 до 28,0 % и сопровождается увеличением сроков схватывания

The introduction of a hyperplasticizer leads to a decrease in the normal density of the cement dough from 36.0 to 28.0% and is accompanied by an increase in setting time (beginning from 34 to 52 minutes, end from 60 to 80 minutes),

РИСУНОК 1

СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО, ТВЕРДЕВШЕГО 28 сут. Увеличение: а, в – 5000 крат; б, г – 15000 крат

Figure 1

Structure of composite binder hardened for 28 days. Magnification: a, c – x 5000; b, d – x 15000

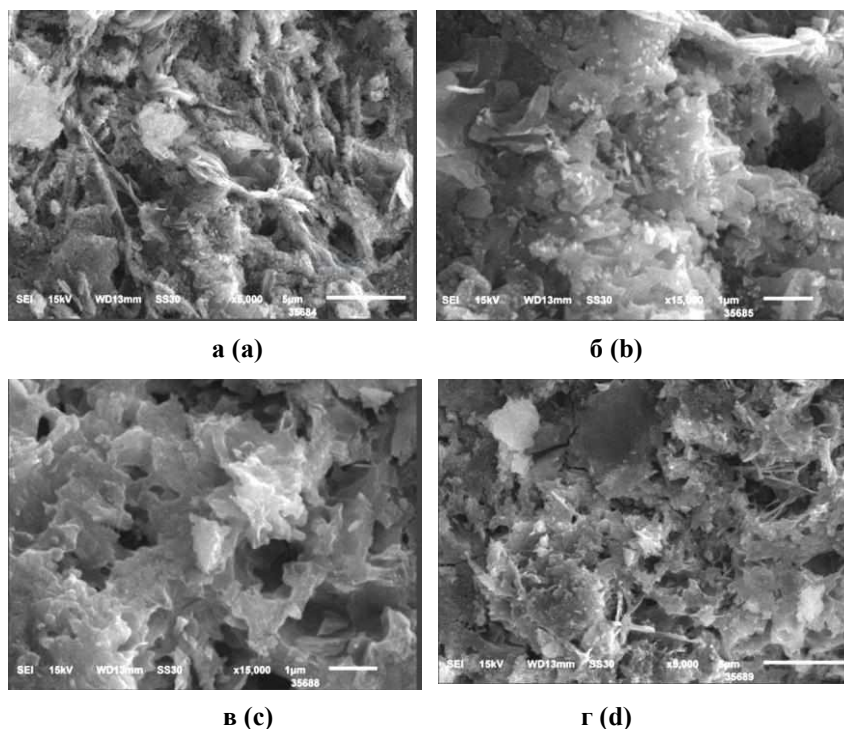


ТАБЛИЦА 3 СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА С ДОБАВКОЙ Melflux 4930  
Table 3 Properties of cement paste with the additive Melflux 4930

Состав Composition	Содержание, мас. % Content, wt%	Нормальная густота, % Normal consistency	Сроки схватывания, мин Setting time (min)	
			начало initial	окончание final
90 % ПЦ + 10 % САЦ	0	36,0	34	60
	0,1	35,0	34	67
	0,2	32,5	37	65
	0,3	31,5	41	65
	0,4	30,0	50	67
	0,5	29,0	50	68
	0,6	28,0	52	80

(начало — с 34 до 52 мин, конец — с 60 до 80 мин), что свидетельствует о замедлении гидратационных процессов и улучшении реологических свойств системы. Снижение значений НГ приводит к росту прочности, как при изгибе, так и при сжатии (рис. 2).

Экспериментальные данные показали, что оптимальные прочностные характеристики при изгибе и сжатии достигаются при содержании гиперпластификатора 0,2 – 0,3 мас. %. К 28 суткам прочность при изгибе возрастает с 8,5 до 13,7-13,9 МПа, а при сжатии – с 56,9 до 59,365,6 МПа. На основании полученных результатов для разработки штукатурной гидроизоляционной смеси выбрана дозировка гиперпластификатора Melflux 4930 в количестве 0,25 мас. %.

К 28 суткам твердения состава 90% ПЦ + 10% САЦ с добавлением 0,3% гиперпластификатора (Melflux) в структуре цементного камня присутствуют низко- и высокоосновные гидросиликаты аморфной формы, а также гидроалюминаты гексагональной сингонии (CAH<sub>10</sub>) в виде призм и пластинок; возможна фиксация моногидросульфалюмината кальция МГСАК (рис. 3).

which indicates a slowdown in hydration processes and an improvement in the rheological properties of the system. A decrease in NC values leads to an increase in strength, both during bending and compression (Fig. 2).

Experimental data have shown that optimal bending and compression strength characteristics are achieved with a hyperplasticizer content of 0.2 – 0.3% by weight. By day 28, bending strength increases from 8.5 to 13.7-13.9 MPa, and compression strength increases from 56.9 to 59.3-65.6 MPa. Based on the results obtained, the dosage of the Melflux 4930 hyperplasticizer in the amount of 0.25 wt. % was selected for the development of a plaster waterproofing mixture.

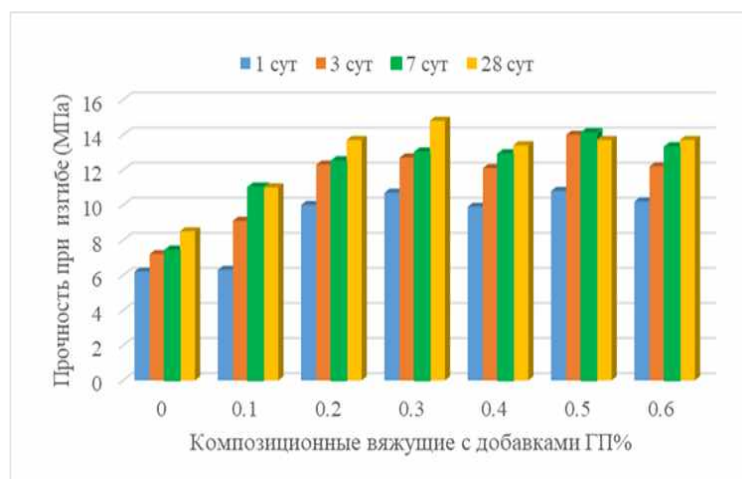
By the 28th day of hardening of the composition of 90% PC + 10% AC with the addition of 0.3% hyperplasticizer (Melflux), low- and high-base amorphous hydrosilicates, as well as hexagonal syngony hydroaluminates (CAH<sub>10</sub>) in the form of prisms and plates, are present in the cement stone structure; fixation of calcium monohydrosulfoaluminate is possible (Fig. 3).

**РИСУНОК 2**

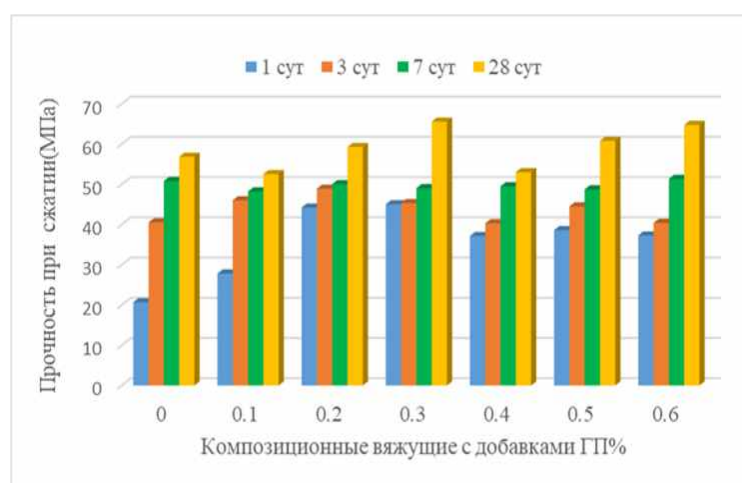
**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГИПЕРПЛАСТИФИКАТОРА Melflux 4930 НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ при изгибе (а) при сжатии (б).**

**Figure 2**

The effect of the content of Melflux 4930 hyperplasticizer on the bending strength (a) and compression (b) of cement stone



**а (а)**



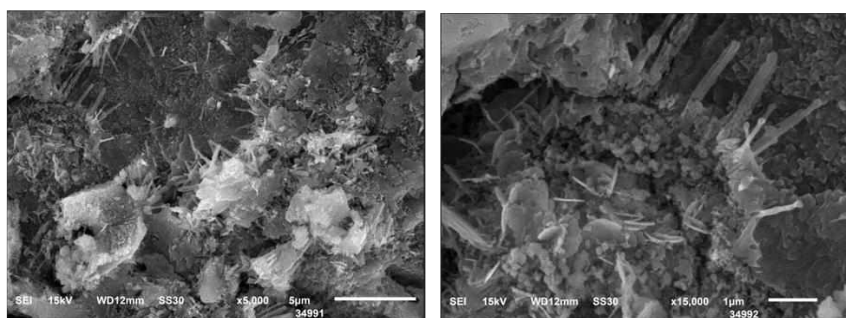
**б (б)**

**РИСУНОК 3**

**СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО С ДОБАВКОЙ Melflux 4930, ТВЕРДЕВШЕГО 28 СУТ: Увеличение, а – 5000 крат; б – 15000 крат**

**Figure 3**

The structure of the composite binder with the addition of Melflux 4930, hardened for 28 days: Magnification, a – x 5000; b – x 15000



**а (а)**

**б (б)**

Аналогичные исследования были выполнены и для суперпластификатора Melment F-10 с целью оценки его влияния на свойства композиционного вяжущего (90% ПЦ + 10% САЦ). Для снижения водопотребности и уплотнения цементного камня в композиционное вяжущее вводили пластификатор Melment F-10 в количестве 0,1-0,6 % от массы цемента (табл. 4).

Добавление суперпластификатора снижает нормальную плотность цементного теста с 36,0 до 31,0 %, однако менее существенно, чем гиперпластификатор. При использовании Melment F-10 начало схватывания остаётся практически неизменным (34-35 мин), тогда как конец увеличивается с 60

Similar studies were performed for the Melment F-10 superplasticizer in order to evaluate its effect on the properties of the composite binder (90% PC + 10% SAC). To reduce water consumption and cement stone compaction, Melment F-10 plasticizer was introduced into the composite binder in an amount of 0.1-0.6% by weight of cement (Table 4).

The addition of a superplasticizer reduces the normal consistency of the cement paste from 36.0 to 31.0 wt.%, although to a lesser extent than a hyperplasticizer. When Melment F-10 is used, the initial setting time remains practically unchanged (34-35 min), whereas the final setting time increases from 60 to 80 min. The decrease

до 80 мин. Снижение значений НГ приводит к росту прочности, как при изгибе, так и при сжатии (рис.4).

in normal consistency values leads to an increase in strength, both in bending and in compression (Fig. 4).

ТАБЛИЦА 4 СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА С ДОБАВКОЙ Melment F-10  
Table 4 Properties of cement paste with the addition of Melment F-10

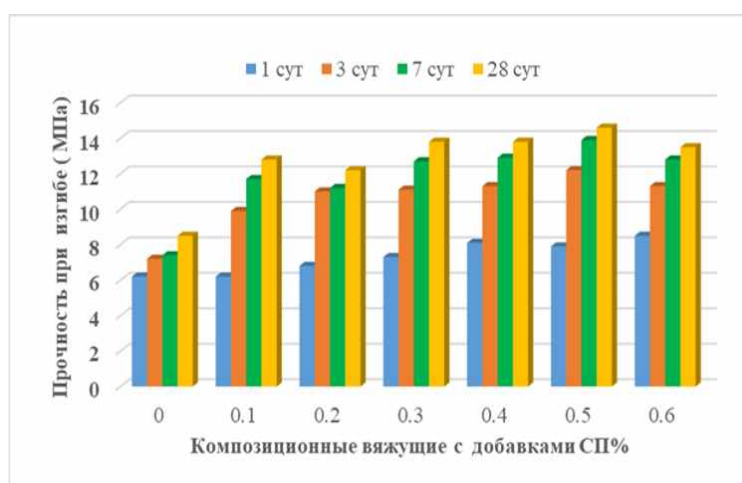
Состав Composition	Содержание, мас. % Content, wt%	Нормальная густота, % Normal consistency, %	Сроки схватывания, мин Setting time (min)	
			начало initial	окончание final
90 % ПЦ + 10 % САЦ	0	37,0	34	60
	0,1	35,5	35	70
	0,2	34,0	35	72
	0,3	32,5	35	76
	0,4	32,0	35	78
	0,5	31,5	35	80
	0,6	31,0	35	80

РИСУНОК 4

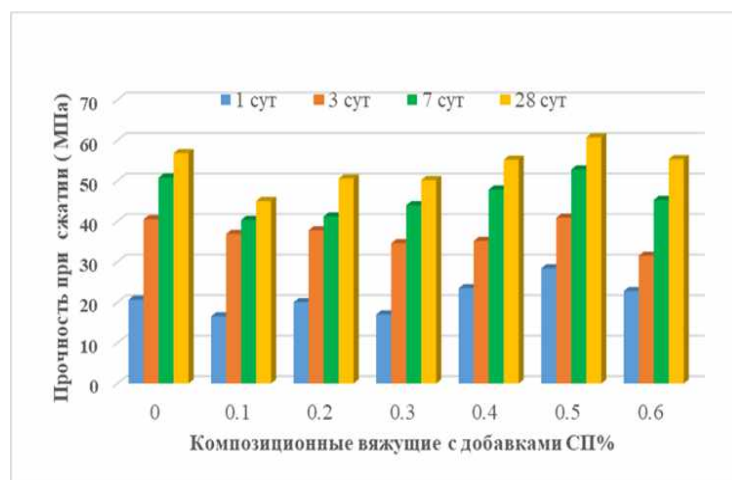
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СУПЕР-ПЛАСТИФИКАТОРА Melment F-10 НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ при изгибе (а) при сжатии (б).

Figure 4

The effect of the content of Melment F-10 superplasticizer on the bending strength (a) and compression (b) of cement stone



а (а)



б (б)

Из рис. 4 следует, что добавка Melment F-10 (0,1-0,6 мас. %) способствует повышению прочности при изгибе на всех стадиях твердения. Прочность при сжатии возрастает в ранние сроки при содержании 0,4 мас. % и выше, а к 28 суткам положительный эффект сохраняется только при концентрации 0,5 мас. %. Оптимальным признано введение 0,5 мас. % Melment F-10, обеспечивающее прочность при изгибе 14,6 МПа и при сжатии 60,8 МПа.

As shown in Fig. 4, the addition of Melment F-10 (0.1-0.6 wt.%) promotes an increase in flexural strength at all stages of hardening. Compressive strength increases at early ages when the content is 0.4 wt.% or higher, while by 28 days the positive effect is retained only at a concentration of 0.5 wt.%. The introduction of 0.5 wt.% Melment F-10 is considered optimal, providing a flexural strength of 14.6 MPa and a compressive strength of 60.8 MPa.

К 28 суткам твердения композиционный цементный камень (90 % ПЦ + 10 % САЦ) с 0,5 мас. % Melment F- 10 формирует плотную малопористую структуру с преобладанием С-S-H, стабилизированным этtringитом и минимальным содержанием непрореагировавших фаз(рис.5), что обеспечивает высокие эксплуатационные свойства.

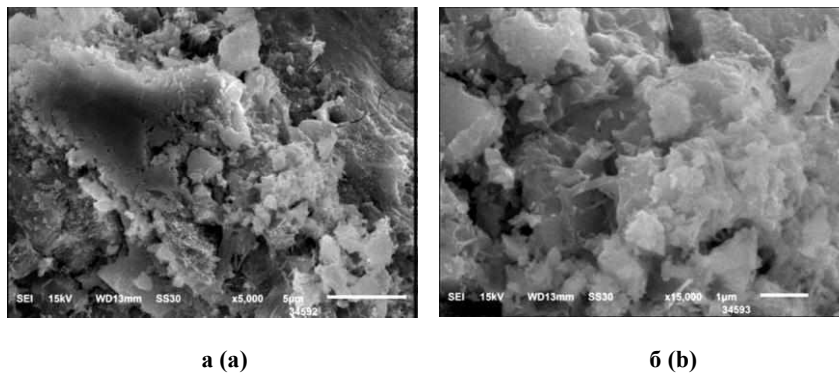
By 28 days of curing, the composite cement stone (90% PC + 10% SAC) with 0.5 wt.% Melment F-10 develops a dense, low-porosity microstructure dominated by C-S-H, stabilized ettringite, and a minimal number of unreacted phases (Fig. 5), which ensures high performance characteristics

**РИСУНОК 5**

**СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО С ДОБАВКОЙ Melment F-10, ТВЕРДЕВШЕГО 28 СУТ:**  
Увеличение, а – 5000 крат;  
б – 15000 крат

**Figure 5**

**The structure of the composite binder with the addition of Melment F-10, hardened for 28 days:**  
Magnification, a – x 5000; b – x 15000



Для оптимальных составов с пластифицирующими добавками Meflux (4930) и суперпластификатором Melment F-10 определены подвижность и живучесть композиционного состава (табл. 5).

For the optimal compositions containing the plasticizing additive Meflux (4930) and the superplasticizer Melment F- 10, the workability and cohesiveness of the composite mixture were determined (table 5).

Увеличение содержания мелкого заполнителя (песка) при использовании гиперпластификатора снижает водопотребность растворной смеси с 28,0 до 25,0 %, однако сопровождается потерей подвижности и живучести. Уменьшение доли вяжущего в присутствии суперпластификатора также уменьшает водопотребность (с 35,0 до 30,5 %), при этом наблюдается аналогичное снижение подвижности и живучести смеси (табл. 5).

Increasing the content of fine aggregate (sand) when using a hyperplasticizer reduces the water demand of the mortar from 28.0 to 25.0%, but is accompanied by a loss of workability and cohesiveness. A decrease in the binder fraction in the presence of the superplasticizer also reduces the water demand (from 35.0 to 30.5%), while a similar decline in the mixture’s workability and cohesiveness is observed (table 5).

Прочностные показатели композиции с добавкой Melment несколько ниже, чем в случае применения добавки Meflux, но тенденции сохраняются (табл. 6). Прочность композиционного состава зависит от соотношения вяжущее/песок. Вероятно, в присутствии пластификатора в ранние сроки происходит некоторое замедление процессов гидратации и твердения, а затем к 28 сут процесс ускоряется за счет меньшего содержания воды в системе.

The strength characteristics of the composition with the addition of Melment are slightly lower than those observed with the use of Meflux, but the overall trends are maintained (table 6). The strength of the composite mixture depends on the binder-to-sand ratio. In the presence of a plasticizer, early-age hydration and hardening processes are likely somewhat delayed, while by 28 days the process accelerates due to the reduced water content in the system.

**ТАБЛИЦА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОДВИЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА**  
**Table 5. Results of mobility and survivability of composite composition**

Состав Composition	Содержание, % Content, %		НГ, % NC, %	Подвижность (см) Flowability (sm)
	Вяжущее binder	песок sand		
10% САЦ +90% ПЦ+ 0,25% Meflux 4930	50	50	25,0	11,0
	60	40	28,0	9,5
10% САЦ +90% ПЦ+ 0,5% Melment F-10	50	50	30,5	10,0
	60	40	35,0	9,0

Далее, согласно ГОСТ 58277-2018, определяли капиллярное водопоглощение (п. 8), прочность сцепления (адгезию) раствора с основанием (п. 9), морозостойкость затвердевших растворов (п. 10) и водонепроницаемость В табл. 7 приведены полученные значения в сравнении с

Furthermore, according to GOST 58277-2018, the capillary water absorption (clause 8), the bond strength (adhesion) of the mortar to the substrate (clause 9), the frost resistance of hardened mortars (clause 10), and the water impermeability were determined. Tables 7 present the

нормативными показателями по ГОСТ 34669-2020<sup>3</sup> и obtained values in comparison with the standard requirements of GOST 34669-2020<sup>3</sup> and GOST 34885-2022<sup>4</sup>.

**ТАБЛИЦА 6 ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА**  
**Table 6 Strength parameters of the composite composition**

Состав Composition	Содержание, % Content, %		Прочность, сут МПа Strength MPa, during hardening, day, MPa			
	вяжущее binder	песок sand	при изгибе (in bending)		при сжатии (in compression)	
			1 сут (day)	28 сут (day)	1 сут(day)	28 сут(day)
10% САЦ +90% ПЦ+0,25% Melflux 4930	50	50	8,3	17,5	60,1	93,1
	40	60	5,9	15,1	41,1	100,1
10% САЦ +90% ПЦ+0,5% Melment F-10	50	50	5,1	13,7	44,5	82,0
	40	60	6,3	11,2	31,8	86,3

**ТАБЛИЦА 7 СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА**  
**Table 7 Properties of the composite composition**

Показатель Indicator	Значение показателя The value of the indicator			
	Полученное с Melflux Received from Melflux	Полученное с Melment Received from Melment	По ГОСТ 34669- 2020 According to GOST 34669-2020	По ГОСТ 34885- 2022 According to GOST 34885-2022
Подвижность растворных смесей Flowability of mortar	11,0- 9,5 см	10,0 - 9,0 см	не менее Пк3	
Сохраняемость первоначальной подвижности растворных смесей Retention of the initial workability of mortar	35 мин	32 мин	не менее 30 мин	
Водоудерживающая способность растворных смесей Water retention of mortar	93%	91%	не менее 90 %	
Прочность при сжатии в возрасте 28 сут Compressive strength at the age of 28 days	93-100 МПа	82,0 - 82,3 МПа		не менее 25 МПа
Адгезия к бетону, 28 сут Adhesion to concrete, 28 days	2,6 МПа	2,4 МПа		не менее 2,0 МПа
Линейная относительная деформация расширения Linear relative expansion strain	0,4 мм/м	0,4 мм/м		не менее 0,2 мм/м и не более 0,8 мм/м в возрасте 14 и 28 сут
Марка по водонепроницаемости в возрасте 28 сут Brand for water resistance at the age of 28 days	0,78	0,78		не менее W6

### Заключение

Таким образом свойства растворной смеси с фракционированным песком зависят от соотношения вяжущего и песка в композиции. Повышенная концентрация песка в сочетании с пластификаторами способствует более плотной структуре затвердевшего раствора, снижению

### Conclusion

Thus, the properties of mortar with fractionated sand depend on the binder-to-sand ratio in the composition. An increased sand content in combination with plasticizers promotes a denser microstructure of the hardened mortar, reduces porosity, and enhances mechanical strength. Test re-

<sup>3</sup> ГОСТ 34885-2022 Система сухих строительных гидроизоляционных смесей на цементном вяжущем для герметизации статических швов (трещин) в строительных конструкциях. Технические условия. - М. Стандартинформ, 2022. - 16 с.

GOST 34885-2022. Dry construction waterproofing mixture system based on cement binder for sealing static joints (cracks) in building structures. Technical conditions. - M. Standartinform, 2022. - 16 p.

<sup>4</sup> ГОСТ 34669-2020 Смеси сухие строительные гидроизоляционные проникающие на цементном вяжущем. Технические условия. - М.: Стандартинформ, 2020. - 22 с.

GOST 34669-2020 Dry construction waterproofing penetrating mixes based on cement binders. Specifications. - Moscow: Standartinform, 2020. - 22 p.

пористости и увеличению механической прочности. Результаты испытаний показали, что состав с содержанием 50 % вяжущего и 50 % песка демонстрирует более высокую раннюю прочность как при изгибе и, так и при сжатии по сравнению с составом 40 % вяжущего и 60 % песка. На первые сутки твердения данный состав обеспечивает прочность при изгибе 8,3 МПа и прочность при сжатии 60,1 МПа. В возрасте 28 сут прочность затвердевшего раствора композиции с 0,25 % Melflux 4930 составляет 15,1-17,5 МПа при изгибе и 93,1-100,0 МПа при сжатии, а для состава с 0,5 % Melment F-10 - 11,213,7 МПа и 82,0-86,3 МПа, соответственно. Учитывая эти показатели, рекомендуется применять состав с соотношением 50 % вяжущего и 50 % песка для гидроизоляционных штукатурных смесей.

#### Литература:

1. Pan. W. Degradation mechanisms of polyurethane grouting materials under quasi-static and cyclic compression loading: density and size effects / W. Pan, Y. Han, Z. Wang et al // *Constr. Build Mater.* - 2023. - Vol 408. - 133795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133795>.
2. Shill. SK. Performance of amine cured epoxy and silica fume modified cement mortar under military airbase operating conditions/ SK Shill, Deen S - Al, M. Ashraf et al// *Constr Build Mater.* 2020. - Vol 232. - 117280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117280>
3. Repair mortars obtained by plasma modification and vortex activation / V. Ushkov, R. Ibragimov, O. Figovsky, S. Samchenko // *Architecture and Engineering.* – 2022. – Vol. 7, No. 4. – P. 60-69. – <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2022-7-4-60-69> – EDN PJYNOY.
4. Andrew. RM. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, 1928-2018/ R.M Andrew // *Earth Syst Sci Data.* - 2019.- Vol 11(4). - p. 1675 - 1710. <https://doi.org/10.5281/zenodo.831454>
5. Yuan. Q. Civil engineering materials/ Q. Yuan, ZQ Liu, KR Zheng et al// Changsha: Central South University Press. - 2021.
6. Кривобородов Ю.Р. Специальные цементы: разновидности, свойства и применение // *Техника и технология силикатов.* 2023. Т. 30. № 1. С. 84-91
7. Кузнецова, Т. В. Химия, состав и свойства специальных цементов / Т. В. Кузнецова, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко // *Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий : материалы научно-практической конференции, Томск, 03–04 октября 2000 года / Томский политехнический университет (ТПУ). Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2000. – С. 96-98. – EDN TOEXOZ.*
8. Gartner. E. Alternative cement clinkers. / E. Garther, T. Sui // *Cem Concr Res.*- 2018. - Vol.114 -p 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>.
9. Самченко, С.В. Влияние дисперсности расширяющегося компонента на свойства цементов / С. В. Самченко, Д. А. Зорин // *Техника и технология силикатов.* – 2006. – Т. 13, № 2. – С. 2-7. – EDN KWMZHD.
10. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // *Cement, Wapno, Beton.* – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
11. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфалоуминатные цементы/. - М.: Стройиздат, 1986. 208 с.
12. Samchenko, S. V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation / S. V. Samchenko, T. V. Kouznetsova // *Cement, Wapno, Beton.* – 2014. – Vol. 2014, No. 5. – P. 317-322. – EDN VACITJ.

sults showed that the composition containing 50% binder and 50% sand exhibits higher early-age strength (both in bending and compression) compared to the composition with 40% binder and 60% sand. At one day of curing, this composition provides a flexural strength of 8.3 MPa and a compressive strength of 60.1 MPa. At 28 days, the hardened mortar of the composition with 0.25% Melflux 4930 shows a flexural strength of 15.1-17.5 MPa and a compressive strength of 93.1-100.0 MPa, whereas for the composition with 0.5% Melment F-10, the values are 11.2-13.7 MPa and 82.0-86.3 MPa, respectively. Considering these results, it is recommended to use a composition with a 50% binder and 50% sand ratio for waterproofing plaster mortars.

#### References

1. Pan. W. Degradation mechanisms of polyurethane grouting materials under quasi-static and cyclic compression loading: density and size effects / W. Pan, Y. Han, Z. Wang et al // *Constr Build Mater.* - 2023. - Vol 408. - 133795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133795>.
2. Shill. SK. Performance of amine cured epoxy and silica fume modified cement mortar under military airbase operating conditions/ SK Shill, Deen S - Al, M. Ashraf et al// *Constr Build Mater.* 2020. - Vol 232. - 117280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117280>
3. Repair mortars obtained by plasma modification and vortex activation / V. Ushkov, R. Ibragimov, O. Figovsky, S. Samchenko // *Architecture and Engineering.* – 2022. – Vol. 7, No. 4. – P. 60-69. – <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2022-7-4-60-69> – EDN PJYNOY.
4. Andrew. RM. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, 1928-2018/ R.M Andrew // *Earth Syst Sci Data.* - 2019.- Vol 11(4). - p. 1675 - 1710. <https://doi.org/10.5281/zenodo.831454>
5. Yuan. Q. Civil engineering materials/ Q. Yuan, ZQ Liu, KR Zheng et al// Changsha: Central South University Press. - 2021.
6. Krivoborodov Yu.R. Special cements: varieties, properties and applications // *Engineering and technology of silicates.* 2023.Vol. 30. No1. Pp 84 – 91.
7. Kuznetsova, T. V. Chemistry, composition and properties of special cements / T. V. Kuznetsova, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko // *Chemistry and chemical technology at the turn of the millennium: materials of the scientific and practical conference, Tomsk, October 3–4, 2000 / Tomsk Polytechnic University (TPU). Vol. 1. – Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2000. – P. 96–98. – EDN TOEXOZ.*
8. Gartner. E. Alternative cement clinkers. / E. Garther, T. Sui // *Cem Concr Res.*- 2018. - Vol.114 -p 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>.
9. Samchenko, S.V. Influence of dispersion of the expanding component on the properties of cements / S.V. Samchenko, D.A. Zorin // *Engineering and technology of silicates.* - 2006. - Vol. 13, No. 2. - Pp. 2-7. - EDN KWMZHD.
10. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // *Cement, Wapno, Beton.* – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
11. Kuznetsova T.V. Aluminate and sulfoaluminate cements/. - М.: Stroyizdat, 1986. 208 p.
12. Samchenko, S. V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation / S. V. Samchenko, T. V. Kouznetsova // *Cement, Wapno, Beton.* – 2014. – Vol. 2014, No. 5.

13. Li. G. Improvement of workability and early strength of calcium sulfoaluminate cement at various temperature by chemical admixtures. / G. Li, J. Zhang, Z. Song, C. Shi, A. Zhang// Construct. Build. Mater. - 2018.- Vol 160.- p. 427439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.076>.
14. Cau Dit Coumes C. Calcium sulfoaluminate cement blended with OPC: a potential binder to encapsulate low-level radioactive slurries of complex chemistry/ C. Cau Dit Coumes, S. Courtois, S. Peysson, J. Ambroise, J. Pera// Cem. Concr. Res. - 2009. - Vol 39 (9). - p. 740 - 747. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.016>.
15. Li. H. Utilization of low-quality desulfurized ash from semi-dry flue gas desulfurization by mixing with hemihydrate gypsum/ H. Li, H. Zhang, L. Li, Q. Ren, X. Yang, Z. Jiang, Z. Zhang// Fuel. - 2019. - Vol. 255. - 115783. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115783>.
16. Increasing the Hydration Activity of Tricalcium Silicate by Adding Microdispersed Ettringite as a Nucleating Agent / Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko, A. V. Korshunov [et al.] // Materials. - 2023. - Vol. 16, No. 22. - P. 7078. - DOI 10.3390/ma16227078. - EDN TQJBDC.
17. Самченко С.В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов/ Самченко С. В.; Федеральное агентство по образованию, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Издательский центр М. 2005. 154 с.
18. Самченко, С. В. Влияние суперпластификатора на морфологию кристаллов этtringита / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. - 2015. - Т. 22, № 2. - С. 17-21. - EDN UACCCX.
19. Кузнецова, Т.В., Самченко С.В. Микроскопия материалов цементного производства - М.: МИКХиС, 2007. - 304 с.
20. Li. H. Investigation on the potential of waste cooking oil as a grinding aid in Portland cement/ H. Li, J. Zhao, Y. Huang, Z. Jiang, X. Yang, Z. Yang, Q. Chen// J. Environ. Manage. - 2016.- Vol184 (3). - p. 545-551. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.027>
21. Pelletier. F. The ternary system Portland cement calcium sulfoaluminate clinker-anhydrite: hydration mechanism and mortar properties/L. Pelletier, F. Winnefeld, B. Lothenbach // Cem. Concr. Compos. - 2010. - Vol.32 (7). p.497-507. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.010>.
22. Pelletier - Chaignat. F. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement - calcium sulfoaluminate clinker-calcium sulphate binders/ L. Pelletier-Chaignat, F. Winnefeld, B. Lothenbach, G.L. Saout, C.J. Muller, C. Famy// Cem. Concr. Compos. - 2011.- Vol 35(3). - p.551-561. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.005>.
23. Liu. T. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method/ T. Liu, Z. Wang, D. Zou, A. Zhou, J. Du// Cem. Concr. Compos. Res. - 2019. - Vol .122. - p.72-82. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.004>.
24. Qin. L. Potential application of Portland cement-calcium sulfoaluminate cement blends to avoid early age frost damage/ L. Qin, X. Gao, A. Zhang/, Construct. Build. Mater. - 2018.- Vol. 190. - p. 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.136>.
25. Qin. T. Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high-performance concrete/ T. Liu, H. Wei, D. Zou, A. Zhou, H. Jian// J. Clean, Prod. - 2020.- Vol. 249.119333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119333>.
26. Yang. J. Eco-friendly treatment of low-calcium coal fly ash for high pozzolanic reactivity: a step towards waste utilization in sustainable building material/ J. Yang, J. Huang, Y. Su, X. He, H. Tan, W. Yang, B. Strnadell// J. Clean, Prod. - 2019. - Vol. - P. 317-322. - EDN VACITJ.
13. Li. G. Improvement of workability and early strength of calcium sulfoaluminate cement at various temperature by chemical admixtures. / G. Li, J. Zhang, Z. Song, C. Shi, A. Zhang// Construct. Build. Mater. - 2018.- Vol 160.- p. 427439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.076>.
14. Cau Dit Coumes C. Calcium sulfoaluminate cement blended with OPC: a potential binder to encapsulate low-level radioactive slurries of complex chemistry/ C. Cau Dit Coumes, S. Courtois, S. Peysson, J. Ambroise, J. Pera// Cem. Concr. Res. - 2009. - Vol 39 (9). - p. 740 - 747. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.016>.
15. Li. H. Utilization of low-quality desulfurized ash from semi-dry flue gas desulfurization by mixing with hemihydrate gypsum/ H. Li, H. Zhang, L. Li, Q. Ren, X. Yang, Z. Jiang, Z. Zhang// Fuel. - 2019. - Vol. 255. - 115783. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115783>.
16. Increasing the Hydration Activity of Tricalcium Silicate by Adding Microdispersed Ettringite as a Nucleating Agent / Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko, A. V. Korshunov [et al.] // Materials. - 2023. - Vol. 16, No. 22. - P. 7078. - DOI 10.3390/ma16227078. - EDN TQJBDC.
17. Samchenko S.V. The role of ettringite in the formation and genesis of the structure of special cements / Samchenko S.V.; Federal Education Agency, D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Publishing Center M. 2005. 154 p.
18. Samchenko, S. V. Influence of superplasticizer on the morphology of ettringite crystals / S. V. Samchenko, E. M. Makarov // Engineering and technology of silicates. - 2015. - Vol. 22, No. 2. - P. 17-21. - EDN UACCCX.
19. Kuznetsova, T.V., Samchenko S.V. Microscopy of materials of cement production - M.: MIKHiS, 2007. - 304 p.
20. Li. H. Investigation on the potential of waste cooking oil as a grinding aid in Portland cement/ H. Li, J. Zhao, Y. Huang, Z. Jiang, X. Yang, Z. Yang, Q. Chen// J. Environ. Manage. - 2016.- Vol184 (3). - p. 545-551. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.027>
21. Pelletier. F. The ternary system Portland cement calcium sulfoaluminate clinker-anhydrite: hydration mechanism and mortar properties/L. Pelletier, F. Winnefeld, B. Lothenbach // Cem. Concr. Compos. - 2010. - Vol.32 (7). p.497-507. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.010>.
22. Pelletier - Chaignat. F. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement - calcium sulfoaluminate clinker-calcium sulphate binders/ L. Pelletier-Chaignat, F. Winnefeld, B. Lothenbach, G.L. Saout, C.J. Muller, C. Famy// Cem. Concr. Compos. - 2011.- Vol 35(3). - p.551-561. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.005>.
23. Liu. T. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method/ T. Liu, Z. Wang, D. Zou, A. Zhou, J. Du// Cem. Concr. Compos. Res. - 2019. - Vol .122. - p.72-82. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.004>.
24. Qin. L. Potential application of Portland cement-calcium sulfoaluminate cement blends to avoid early age frost damage/ L. Qin, X. Gao, A. Zhang/, Construct. Build. Mater. - 2018.- Vol. 190. - p. 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.136>.
25. Qin. T. Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high-performance concrete/ T. Liu, H. Wei, D. Zou, A. Zhou, H. Jian// J. Clean, Prod. - 2020.- Vol. 249.119333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119333>.
26. Yang. J. Eco-friendly treatment of low-calcium coal fly ash for high pozzolanic reactivity: a step towards waste

238.- 117962. <https://doi.org/10.1016/i-icle-pro.2019.117962>.  
27. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня : монография / С. В. Самченко. — М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, – 2016. — 284 с. — ISBN 978-5-7264-1313-6. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/49874.html>  
28. Макаров, Н.А. Практикум по технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов: учеб. пособие / Н. А. Макаров, Е. Н. Потапова, Д. О. Лемешев, А. И. Захаров, И. Н. Тихомирова, А. В. Беляков // Под ред. Н.А. Макарова. - Москва; Вологда: Инфра-Инженерия. - 2025. - 288 с.

utilization in sustainable building material/ J. Yang, J. Huang, Y. Su, X. He, H. Tan, W. Yang, B. Strnadel// J. Clean, Prod. - 2019. - Vol. 238.- 117962. <https://doi.org/10.1016/i-icle-pro.2019.117962>.  
27. Samchenko, S. V. Formation and genesis of the structure of cement stone: monograph / S. V. Samchenko. - M.: Moscow State University of Civil Engineering, IPR Media, EBS ASV, - 2016. - 284 p. - ISBN 978-5-7264-1313-6. - Text: electronic // Electronic library system IPR BOOKS: [site]. - URL: <http://www.iprbookshop.ru/49874.html>  
28. Makarov, N.A. Practical training in the technology of refractory non-metallic and silicate materials: textbook / N. A. Makarov, E. N. Potapova, D. O. Lemeshev, A. I. Zakharov, I. N. Tikhomirova, A. V. Belyakov // Ed. by N.A. Makarov. - Moscow; Vologda: Infra-Engineering. - 2025. - 288 p.

**Мин Хейн Хтет** - аспирант факультета технологии неорганических веществ и высокотемпературных материалов, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Москва  
*E-mail:* [mmhem29@mail.ru](mailto:mmhem29@mail.ru); (автор для связи)

**Min Hein Htet** - Postgraduate student, studying at the Faculty of Technology of Inorganic Substances and High-temperature Materials, D. I. Mendeleev Russian State Technical University, Russia, Moscow.  
*E-mail:* [minhein29@mail.ru](mailto:minhein29@mail.ru) (author for contact)

**Аунг Чжо Чжо** - магистрант факультета технологии неорганических веществ и высокотемпературных материалов, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Москва  
*E-mail:* [aungkyawkyaw10102014@mail.ru](mailto:aungkyawkyaw10102014@mail.ru).

**Aung Kyaw Kyaw** - Master's Degree from the Faculty of Technology of Inorganic Substances and High-Temperature Materials, Mendeleev Russian Technical Technical University, Moscow, Russia. *E-mail:* [aungkyawkyaw10102014@mail.ru](mailto:aungkyawkyaw10102014@mail.ru).

**Потапова Екатерина Николаевна** - д.т.н., профессор кафедры химической технологии композиционных и вяжущих материалов, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Москва. *E-mail:* [potapova.em@muctr.ru](mailto:potapova.em@muctr.ru).

**Ekaterina Nikolaevna Potapova** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Chemical Technology of Composite and Binding Materials, D. I. Mendeleev Russian State Technical University, Moscow, Russia.  
*E-mail:* [potapova.e.n@muctr.ru](mailto:potapova.e.n@muctr.ru) .

**Вклад авторов:** *Мин Хейн Хтет* - разработка методик, обработка материала написание статьи; *Аунг Чжо Чжо* - разработка методик, обработка материала написание статьи; *Потапова Е.Н.* - научное руководство, научное редактирование статьи.

**Contribution of the authors:** *Min Hein Htet* - development of methods, processing of material, writing an article; *Aung Kyaw Kyaw* - development of methods, processing of material, writing an article; *Potapova E.N.* - scientific guidance, scientific editing of the article

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.00

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN uguwic

DOI 10.62980/2076-0655-2026-434-445

## ДЕКОРАТИВНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ РЕЦИКЛИНГА ОТХОДОВ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Баруздин А.А.<sup>1</sup>, Закревская Л.В.<sup>2</sup>, Доброхотов В.Б.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Владимирский Государственный Университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

<sup>3</sup> Ярославский Государственный Технический университет

### АННОТАЦИЯ

В статье представлено исследование эксплуатационных свойств декоративного композиционного материала на основе отходов боя керамического кирпича и сшитого полиэтилена. Установлено, что включение в состав заполнителя в виде дробленых отходов сшитого полиэтилена снижает текучесть и удобоукладываемость смеси, что связано с увеличенным трением частиц в смеси из-за их неправильной формы и шероховатой поверхности. Определено, что введение в состав заполнителя из отходов сшитого полиэтилена по сравнению с минеральным заполнителем позволяет снизить плотность изделий (до 1570 кг/м<sup>3</sup>). Выявлено, что образцы материала с полимерным заполнителем обладают более низкой прочностью при сжатии, при этом характер разрушения образцов более пластичный, в момент пиковой нагрузки заполнитель некоторое время удерживает структуру образца от полного разрушения. Показано, что образцы материала с заполнителем только из отходов сшитого полиэтилена обладают значительной усадкой (более 1,5 мм/м). Это связано с пониженным модулем упругости такого заполнителя, который из-за низкой жесткости не может в полной мере сдерживать усадочные деформации цементного камня. В то же время в образцах со смесью полимерного и минерального заполнителя в равных долях усадка значительно снижается (0,8-0,9 мм/м). Выявлено, что образцы материала с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена обладают высоким сопротивлением к истиранию. Такой эффект объясняется природой сшитого полиэтилена, который благодаря своей трехмерной структуре и поперечным связям в молекулах полимера обладает высокой износостойкостью. С помощью dilatометрического метода установлено, что образцы синтезированного материала обладают достаточно высокой морозостойкостью (марка F300). На основании проведенных исследований изготовлены и представлены декоративные изделия с порфировым рисунком, которые могут быть рекомендованы для применения в качестве декоративной напольной, интерьерной или тротуарной плитки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Рециклинг, сшитый полиэтилен, строительная керамика, отходы, прочность, плотность, истираемость, усадка.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Баруздин А.А., Закревская Л.В. Декоративный композиционный материал на основе рециклинга отходов сшитого полиэтилена и строительной керамики // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С.434-445.

<https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-434-445>, EDN uguwic

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN uguwic

DOI 10.62980/2076-0655-2026-434-445

## DECORATIVE COMPOSITE MATERIAL BASED ON WASTE RECYCLING OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE AND BUILDING CERAMICS

Baruzdin A.A.<sup>1</sup>, Zakrevskaya L.V.<sup>2</sup>, Dobrokhотов V.B.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov

<sup>3</sup> Yaroslavl State Technical University

### ABSTRACT

The article presents a study of the operational properties of a decorative composite material based on waste from ceramic bricks and crosslinked polyethylene. It was found that the inclusion of aggregate from waste of cross-linked polyethylene in mixture reduces the spreadability and workability of the paste, which is associated with increased friction of particles in the mixture due to their irregular shape and rough surface. It was determined that the introduction of aggregate from waste of cross-linked polyethylene compared with mineral aggregate makes it possible to reduce the density of products (up to 1,700 kg/m<sup>3</sup>). It has been revealed that samples of a material with a polymer aggregate have significantly reduced compressive strength, while the destruction of the samples occurs more plastically, at the moment of peak load, the aggregate keeps the sample structure from complete destruction for some time. It is shown that the samples of the material with aggregate only from waste of crosslinked polyethylene have a significant shrinkage (more than 1.5 mm/m). This is due to the reduced modulus of elasticity of such aggregate, which, due to its low rigidity, cannot fully restrain the shrinkage deformations of cement stone. At the same time, in samples with a mixture of polymer and mineral aggregate in equal proportions, shrinkage is significantly reduced (0.8-0.9 mm/m). It was revealed that the samples of the material with aggregate from waste of crosslinked polyethylene have a high abrasion resistance. This effect is explained by the nature of cross-linked polyethylene, which, due to its three-dimensional structure and cross-links in polymer molecules, has high abrasion resistance. Using the dilatometric method, it was found that the samples of the synthesized material have a sufficiently high frost resistance (grade F300). Based on the conducted research, decorative products with a porphyry patterns have been produced and presented, which can be recommended for use as decorative floor, interior or paving tiles.

**KEY WORDS:** Recycling, crosslinked polyethylene, construction ceramics, waste, compressive strength, density, abrasion resistance, shrinkage.

**FOR CITATION:** Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Decorative compressive material based on waste recycling of crosslinked polyethylene and building ceramics // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 434 – 445.

<https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-434-445>, EDN uguwic.

## ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XX-XXI в. одной из проблем, которые выходят на передний план становится проблема эффективной утилизации и переработки отходов. В том числе строительных и промышленных отходов. В связи с этим появляется такое понятие как рециклинг – процесс переработки, при котором отходы возвращают в экономический и производственный оборот для получения новой продукции или вторсырья для её изготовления.

Одним из распространенных отходов строительной промышленности, который обладает значительным потенциалом для вторичного применения является бой строительной керамики.

Другим видом строительных и промышленных отходов являются отходы полимеров (кабели, трубы, изоляция, окна, двери, элементы отделки), в том числе сшитых. Такие полимеры благодаря технологии сшивки имеют повышенные механические, диэлектрические, термические свойства, но по этой же причине являются трудно утилизируемыми традиционными способами [1,2]. На 2019 г. мировое производство сшитого полиэтилена превысило 260 тыс. тонн [3]. Рост производства связан с заменой традиционных полимеров на более стойкие сшитые. По данным мирового производителя кабелей «Prismian» ежегодно только у них на производстве образуется до 7500т отходов сшитого полиэтилена (или 80-150т на одно отдельное предприятие). Сопоставимое количество отходов сшитого полиэтилена образуется при производстве труб (80-150т/год на одно предприятие).

Как отходы строительной керамики, так и отходы сшитого полиэтилена представляется возможным использовать при производстве строительных композитов, бетонов, растворов на неорганическом вяжущем.

Отходы строительной керамики возможно использовать в качестве заполнителя, активной тонкодисперсной добавки, наполнителя, частичной замены цемента, пигмента [4–11].

Отходы сшитого полиэтилена, как и другие полимерными отходы возможно применять в качестве заполнителя минеральных композиционных материалов. Такой наполнитель значительно влияет на свойства получаемого изделия: снижает плотность, теплопроводность, может повышать стойкость к истиранию, химстойкость, способность поглощать энергию, морозостойкость, возможно уменьшение усадки и образования микротрещин. В то же время такой наполнитель снижает прочность цементных композиций, что связано с его сниженным модулем упругости и адгезией с цементным камнем [12–20].

В современном мире возрастает интерес к внешнему облику городской среды и интерьера помещений. У строительных изделий зачастую помимо долговечности высоко ценится эстетичный внешний вид. Как отходы сшитого полиэтилена, так и отходы боя строительной керамики имеют потенциал для использования в производстве декоративных композиционных материалов. Тонкомолотый бой строительной керамики в смеси с цементом (в особенности с белым) придает цементному камню красивый декоративный оттенок. В то же время полимерные отходы зачастую обладают яркими однородными цветами. При использовании их в качестве заполнителя после набора изделием прочности можно обнажить его структуру и получить эстетичную декоративную поверхность.

## INTRODUCTION

One of the problems that come to the fore at the turn of the XX-XXI centuries is the problem of effective waste disposal and utilization. Including construction and industrial waste. In this regard, there was such a thing as recycling, a recycling process in which waste is returned to economic and industrial circulation to obtain new products or recyclables for their manufacture.

One of the common construction industry wastes, which has a significant potential for reuse, is the construction ceramics waste.

Another type of construction and industrial waste is polymer waste (cables, pipes, insulation, windows, doors, finishing elements), including crosslinked ones. Such polymers have improved mechanical, dielectric, and thermal properties due to crosslinking technology, but for the same reason they are difficult to recycle using traditional methods [1,2]. The global production of cross-linked polyethylene exceeded 260 thousand tons at 2019 [3]. The increase in production was due to the substitution of traditional polymers with more resistant crosslinked ones. According to the global cable manufacturer "Prismian", up to 7500t of cross-linked polyethylene waste was generated annually in their production alone (or 80-150t per individual factory). A comparable amount of cross-linked polyethylene waste is generated during pipe production (80-150 tons/year per factory).

Waste from construction ceramics and waste from cross-linked polyethylene can be used in the production of building composites, concretes, and mortars based on inorganic binders.

Construction ceramic waste can be used as an aggregate, an active fine-dispersed additive, filler, partial replacement of cement, and pigment [4-11].

Waste of crosslinked polyethylene, like other polymer waste, can be used as an aggregate for mineral composite materials. Such an aggregate significantly affects the properties of the resulting product: density and thermal conductivity decrease, may increase abrasion resistance, chemical resistance, ability to absorb energy, frost resistance, shrinkage and formation of microcracks may decrease. At the same time, such an aggregate reduces the strength of cement compositions, which is associated with its reduced modulus of elasticity and adhesion to cement stone [12-20].

In the modern world, there is an increasing interest in the appearance of the urban environment and the interior of the premises. In addition to durability, aesthetic appearance is often highly appreciated for construction products. Both waste from cross-linked polyethylene and waste from the scrap of construction ceramics have the potential to be used in the production of decorative composite materials. Finely ground construction ceramics mixed with cement (especially white cement) gives the cement stone a beautiful decorative shade. At the same time, polymer waste often has bright, homogeneous colors. When using them as an aggregate, after the product has gained strength, its structure can be exposed and an aesthetic decorative surface can be obtained.

Целью данной работы является исследование эксплуатационных свойств декоративного композиционного материала с применением тонкомолотых отходов строительной керамики и заполнителя на основе отходов сшитого полиэтилена в сравнении с аналогичными образцами с минеральным заполнителем.

### Материалы и методы

Исследования проводились на базе кафедры «Строительного производства» Владимирского Государственного Университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. В рамках исследования использовались стандартные методики испытаний регламентированные ГОСТ и современные методы анализа, обеспечивающие высокую точность и воспроизводимость результатов.

В таблице 1 представлены свойства используемых материалов.

**ТАБЛИЦА 1 СВОЙСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
**Table 1 Properties of the used materials**

Материалы Materials	Свойства Properties
Портландцемент Portland cement	Белый цемент без минеральных добавок марки 500, ПЦБ 1-500-Д0, торговой марки «Cemix ProWhite», $S_{уд}=5000 \text{ см}^2/\text{г}$ ; $НГ=30-32\%$ ; начало схватывания 80-95 мин; конец схватывания – 120-140 мин; White cement without mineral additives grade 500, PCB 1-500-D0, trademark "Cemix ProWhite", Specific surface of particles $S_{sp}=5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ; $NG=30-32\%$ ; the start of setting is 80-95 minutes; the end of setting is 120-140 min.;
Кирпичный бой Brick scarp	Фракция 5-20 мм, $\rho_{ист}=2650 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; Fraction 5-20 mm, true density $\rho=2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;
Отходы сшитого полиэтилена Crosslinked polyethylene waste	Фракция 2,5-5 мм, плотность $0,90 \text{ г}/\text{см}^3$ Fraction 2.5-5 mm, density $0.90 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;
Отсев дробления известнякового щебня Waste during limestone crushing	Фракция 2,5-5 мм, плотность $2,70 \text{ г}/\text{см}^3$ Fraction 2.5-5 mm, density $2.70 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;
Пластификатор макромер П-17	50% раствор, плотность $\geq 1,1 \text{ г}/\text{см}^3$ 50% solution, density $\geq 1,1 \text{ g}/\text{cm}^3$
Поливинилацетатная дисперсия Polyvinyl acetate dispersion	ТУ 2242-011-39778023-2015 TU 2242-011-39778023-2015

В качестве вяжущего использовался белый портландцемент без минеральных добавок марки 500 ПЦБ 1-500-Д0 торговой марки «Cemix ProWhite» соответствующий требованиям ГОСТ 965-89, ГОСТ 30515-2013.

В качестве частичной замены цемента использовались тонкомолотые отходы строительной керамики с  $S_{уд} = 6000...7000 \text{ см}^2/\text{г}$ , которые обладают пуццолановой активностью и при взаимодействии с гидроксидом кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), содержащимся в цементном тесте, могут образовывать гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, укрепляя структуру цементного камня, снижая высолообразование и повышая сопротивляемость выщелачиванию. Кроме того, применение тонкомолотого керамического порошка позволяет добиваться различных оттенков изделий от бледной сиены до средне-коричневого и золотисто-коричневого. Помол отходов керамики производился с помощью лабораторной шаровой мельницы ЛМ-2.

В качестве заполнителя использовались дробленые отходы сшитого полиэтилена с размером частиц 2,5-5 мм. Измельчение производилось с помощью дробилки для пластмасс XFS-300. При этом для наилучшего результата каждую партию полиэтилена подвергали измельчению несколько

The purpose of this work is to study the operational properties of a decorative composite material using finely ground construction ceramic waste and an aggregate based on cross-linked polyethylene waste in comparison with similar samples with a mineral aggregate.

### Materials and methods

The research was conducted on the basis of the Department of "Construction Production" of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov. The study used standard test methods, regulated by GOST standards, and modern analysis methods that ensure high accuracy and reproducibility of the results.

Table 1 shows the properties of the used materials.

White Portland cement without mineral additives of the 500 PCB 1-500-D0 mark of the Cemix ProWhite trademark was used as binder. It complies with the requirements of GOST 965-89, GOST 30515-2013.

Finely ground construction ceramic waste with a specific surface area of  $6000...7000 \text{ cm}^2/\text{g}$  was used as a partial replacement for cement. It has pozzolan activity and interacts with calcium hydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), contained in cement paste, can form calcium hydrosilicates and hydroaluminates, strengthening the structure of cement stone, reducing formation of efflorescence and increasing leaching resistance. In addition, the use of finely ground ceramic powder makes it possible to achieve various shades of products from pale siena to medium brown and golden brown. Ceramic waste was ground using an LM-2 laboratory ball mill.

Crushed waste of cross-linked polyethylene with a particle size of 2.5-5 mm was used as an aggregate. The crushing was carried out using an XFS-300 plastic crusher. At the same time, for the best result, each batch of polyethylene was crushed several times. The smallest fraction possible to obtain on the used equipment was

раз. В работе была использована наименьшая фракция возможная к получению на используемом оборудовании. Частицы более 5 мм подвергались повторному измельчению.

Также был использован минеральный наполнитель в виде отсевов дробления известнякового щебня фракцией 2,5-5 мм.

Для изменения реологических свойств смеси, корректировки водоцементного соотношения и как следствие повышения прочности исследуемых композитов была использована поликарбоксилатная пластифицирующая добавка Макромер П-17 и поливинилацетатная дисперсия (ПВА).

В процессе изготовления образцов была оценена консистенция полученного теста. Консистенция оценивалась по расплыву на встряхивающем столике конуса Хагермана. Свежеприготовленную смесь укладывали в конус и встряхивали на столике 30 раз в течение 30 секунд после чего измерили диаметр расплыва.

Контроль прочности синтезированных образцов осуществлялся в соответствии с ГОСТ-10180-2012. Механические испытания проводились с использованием пресса ПИ-2000-II компании «МЕТРОТЕСТ» (нагрузка до 2000 кН, относительная погрешность силоизмерителя  $\pm 1\%$ , перемещение подвижной плиты до 360 мм, абсолютная погрешность измерения перемещения подвижной плиты при перемещениях до 10 мм -  $\pm 0,1$  мм).

Испытание образцов на истираемость производилось в соответствии с ГОСТ-13087-2018 на круге истирания типа ЛКИ-3М. Истираемость образцов характеризуется потерей массы и изменением высоты образцов, которые вычисляются по формулам (1) и (2):

$$G = \frac{m_1 - m_2}{F} \quad (1)$$

$$\Delta l = l_0 - l \quad (2)$$

Где G – потеря массы образцов после четырех циклов испытания (общий путь истирания 600 м), г/см<sup>2</sup>;

$m_1$  – масса образца до испытания, г;

$m_2$  – масса образца после четырех циклов испытания, г;

F – площадь истираемой грани образца, см<sup>2</sup>;

$\Delta l$  – уменьшение высоты образца, мм;

$l_0$  – средняя высота образца до испытания, мм;

l – средняя высота образца после испытания, мм;

Оценку деформаций усадки у синтезированных образцов производили согласно ГОСТ 24544-2020 на приборе, представленном на рис.1е. Образцы расплаубливали через 24 часа после формирования и сразу устанавливали в устройство для определения усадки и снимали начальные показания прибора. Далее показания приборов снимали через 1,2,3 7 сут и каждую неделю до окончания эксперимента.

Оценку морозостойкости синтезированных образцов производили ускоренным dilatометрическим методом. При такой методике у изготовленных образцов определяется начальный объём, затем их насыщают водой по ГОСТ 10060-2012. Насыщенный водой образец помещают в камеру dilatометра, во вторую камеру помещают стандартный образец, камеры заполняют керосином и герметизируют. Dilатометр помещают в морозильную камеру, выдерживают 30 мин и начинают замораживать со скоростью 0,3 °C/мин до достижения температуры минус (18±2) °C. На графиках фиксируют абсолютные объёмные деформаций испытуемого и стандартного образца во время замораживания и выделяют скачкообразное изменение разности объёмных деформаций, обусловленное переходом воды в лёд. Далее по табличным значениям по максимальному

used in the work. Particles larger than 5 mm were subjected to repeated grinding.

A mineral aggregate in the form of limestone crushing dropout with a fraction of 2.5-5 mm was also used.

Polycarboxylate plasticizing additive Macromer P-17 and a polyvinyl acetate dispersion (PVA) were used to change the rheological properties of the mixture, adjust the water-cement ratio and, as a result, increase the strength of the studied composites.

During the sample manufacturing process, the consistency of the resulting pastes was evaluated. The consistency was assessed by the spreading on the shaking table of the Hagerman cone. The freshly prepared mixture was placed in a cone and shaken on a table 30 times for 30 seconds, after which the diameter of the spread was measured.

The strength control of the synthesized samples was carried out in accordance with GOST-10180-2012. Mechanical tests were carried out using a PI-2000-II press from "METROTEST" company (load up to 2000 kN, relative error of the force meter  $\pm 1\%$ , displacement of the movable plate up to 360 mm, absolute measurement error of displacement of the movable plate when moving up to 10 mm -  $\pm 0.1$  mm).

The samples were tested for abrasion in accordance with GOST-13087-2018 on an LKI-3M type abrasion circle. The abrasion resistance of the samples is characterized by a loss of mass and a change in the height of the samples, which are calculated according to formulas (1) and (2):

Where G is the mass loss of the samples after four test cycles (total abrasion distance 600 m), g/cm<sup>2</sup>;

$m_1$  is the mass of the sample before the test, g;

$m_2$  is the mass of the sample after four test cycles, g;

F is the area of the test face of the sample, cm<sup>2</sup>;

$\Delta l$  is a decrease in the height of the sample, mm;

$l_0$  is the average height of the sample before the test, mm;

l is the average height of the sample after the test, mm;

The shrinkage deformations of the synthesized samples were evaluated according to GOST 24544-2020 on the device shown in Fig.1e. The samples were extracted after 24 hours after molding and immediately installed in a shrinkage detection device and the initial readings of the device were taken. Further, the device readings were taken after 1,2,3 7 days and every week until the end of the experiment.

The frost resistance of the synthesized samples was assessed using a dilatometric method. With this method, the initial volume of the produced samples is determined, then they are saturated with water according to GOST 10060-2012. The sample saturated with water is placed in the dilatometer chamber, a standard sample is placed in the second chamber, the chambers are filled with kerosene and sealed. The dilatometer is placed in a freezer, held for 30 minutes and begins to freeze at a rate of 0.3 °C/min until a temperature of minus (18 ± 2) °C is reached. The graphs record the absolute volumetric deformations of the test and the standard sample during freezing and highlight the abrupt change in the difference in volumetric deformations

относительному увеличению разности объемной деформации испытуемых и стандартного образцов определяется марка по морозостойкости.

Для испытаний на прочность и определения усадочных деформаций использовались образцы балочки размерами 40x40x160 мм. Для испытания на истираемость были изготовлены образцы кубы размерами 70x70x70 мм. Оценка морозостойкости dilatометрическим способом осуществлялась на образцах размерами 100x100x100 мм. Набор прочности образцов происходил в лабораторных условиях при температуре 18-22 °С и влажности воздуха 50-70%.

На рисунке 1 представлено используемое оборудование.

В таблице 2 представлены составы испытуемых образцов.

caused by the transition of water to ice. Further, according to the tabular values for the maximum relative increase in the difference in volumetric deformation of the test and standard samples, the frost resistance grade is determined.

For strength tests and the determination of shrinkage deformations, beam samples of 40x40x160 mm were used. For the abrasion test, cube samples with dimensions of 70x70x70 mm were made. The assessment of frost resistance by dilatometric method was carried out on samples measuring 100x100x100 mm. The samples were hardened in laboratory conditions at a temperature of 18-22 °C and an air humidity of 50-70%.

Figure 1 shows the equipment used.

Table 2 shows the compositions of the tested samples.

### РИСУНОК 1

#### ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

- а – лабораторная шаровая мельница ЛМ-2;
- б – измельчитель для пластмасс XFS-300;
- в – встряхивающий столик и конус Хагермаана;
- г – пресс ПИ-2000-П;
- д – лабораторный круг истирания ЛКИ-3М;
- е – устройство для определения усадки;
- ж – камера dilatометра;

Figure 1

#### Equipment and devices used

- a - laboratory ball mill LM-2;
- b - plastic shredder XFS-300;
- c - shaking table and Hagerman cone;
- d - press PI-2000-P;
- e - laboratory circle of abrasion test LKI-3M;
- f - shrinkage detection device;
- g - dilatometer camera;



ТАБЛИЦА 2 СОСТАВЫ ИСПЫТУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Table 2 Compositions of the tested samples

Марка образца Mark of the sample	Компоненты, кг/м <sup>3</sup> Components, kg/m <sup>3</sup>						
	Заполнитель из отходов сшитого полиэтилена Aggregate from waste of cross-linked polyethylene	Отсев дробления известнякового щебня Dropout from limestone crushing	Портланд цемент белый ПЦБ 1-500-Д0 White Portland cement PCB 1-500-D0	Тонкомолотый порошок из отходов строительной керамики Finely ground powder from construction ceramics waste	Поливинил-ацетатная дисперсия (ПВА) Polyvinyl Acetate dispersion (PVA)	Пластификатор Макромер П-17 Plasticizer Makromer P-17	Вода Water
ПЭ-100 PE-100	385	-	810	350	125	20	205
ИЗВ/ПЭ-50/50 LS/PE-50/50	193	577	810	350	125	20	205
ИЗВ-100 LS-100	-	1155	810	350	125	20	205

Результаты исследования и их обсуждение

The results of the study and their discussion

В таблице 3 приведены свойства испытанных образцов композитов.

Table 3 shows the properties of the tested composite samples.

ТАБЛИЦА 3 СВОЙСТВА ИСПЫТАННЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИТОВ  
Table 3 Compositions of the tested samples

Марка образца Mark of the sample	Свойства образцов Properties of the samples						
	Расплав смеси на встряхивающем столике D, мм Spreading of the mixture on the shaking table D, mm	Плотность ρ, кг/м <sup>3</sup> Density ρ, kg/m <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии R <sub>сж</sub> , МПа Compressive strength R <sub>comp</sub> , МПа	Усадочные деформации в возрасте 60 сут Δl, мм/м Shrinkage deformations at the age of 60 days Δl, mm/m	Морозостойкость по dilatометрическому методу F, циклов Frost resistance according to the dilatometric method F, cycles	Истираемость по изменению массы G, г/см <sup>2</sup> Abrasion resistance by weight change G, g/cm <sup>2</sup>	Истираемость по изменению высоты образца A, мм Abrasion resistance by changing the height of the sample A, mm
ПЭ-100 PE-100	110	1570	26,4	1,88	300	0,129	0,25
ИЗВ/ПЭ-50/50 LS/PE-50/50	140	1875	43,0	0,82	300	0,065	0,20
ИЗВ-100 LS-100	200	2195	83,8	0,75	300	0,349	1,75

На рис.2 представлены результаты определения консистенции смесей, из которых были изготовлены образцы. Из представленных результатов видно, что включение в состав дробленых отходов сшитого полиэтилена снижает текучесть и удобоукладываемость смеси. Такой эффект объясняется неправильной формой и шероховатой поверхностью частиц сшитого полиэтилена. Увеличивается трение частиц с цементным тестом и друг о друга, увеличивается количество цементного теста необходимого для обволакивания заполнителя.

Figure 2 shows the results of determining the consistency of the mixtures from which the samples were made. It can be seen from the presented results that the inclusion in mixture of aggregate from crushed cross-linked polyethylene reduces its fluidity and workability. This effect is explained by the irregular shape and rough surface of the cross-linked polyethylene particles. The friction of the particles with the cement paste and against each other increases, and the amount of cement paste needed to coat the aggregate increases.

РИСУНОК 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСИСТЕНЦИИ СМЕСЕЙ

а – расплав смесей;  
б – диаграмма расплава смесей в зависимости от марки образца

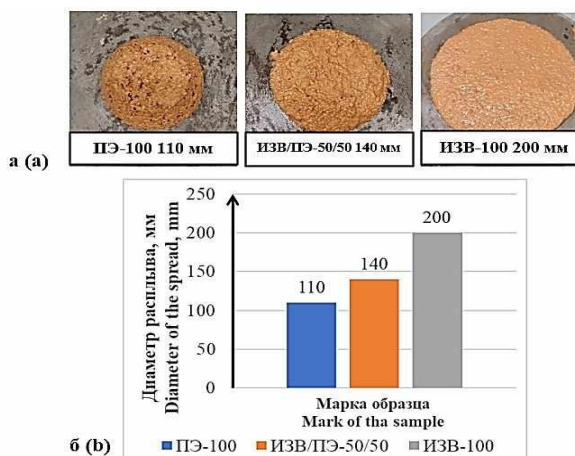


Figure 2

Results of determination of the consistency of pastes

a - spread of mixtures;  
b - the diagram of cone spread of mixtures depending on the brand of the sample

Согласно результатам испытаний при увеличении содержания заполнителя из дробленых отходов сшитого полиэтилена уменьшается плотность получаемых образцов (с 2195 кг/м<sup>3</sup> до 1570 кг/м<sup>3</sup>), такой результат объясняется низкой плотностью полимерных отходов.

При этом при увеличении содержания заполнителя из дробленых отходов сшитого полиэтилена значительно падает прочность образцов при сжатии (Табл.3). Такой

According to the test results, with an increase in the content of aggregate from crushed waste of crosslinked polyethylene, the density of the obtained samples decreases (from 2195 kg/m<sup>3</sup> to 1570 kg/m<sup>3</sup>), this result is explained by the low density of aggregate from polymer waste.

At the same time, with an increase in the aggregate from crushed waste of crosslinked polyethylene content, the compressive strength of the samples significantly decreases

эффект объясняется разной физико-химической природой цементной матрицы и заполнителя из полимерных отходов и низким модулем упругости последнего. В случае, когда модуль упругости заполнителя больше или равен модулю упругости цементного камня (образец ИЗВ-100) напряжение передается через заполнитель, образуя пути передачи напряжений, заполнитель выполняет роль каркаса. В случае с заполнителем из сшитого полиэтилена (образец ПЭ-100) его модуль упругости ниже, чем у цементного камня, поэтому передача напряжений происходит по более жестким участкам строительного раствора.

По полученным при испытании на сжатие данным построены графики напряжения-деформации (рис.3). Восходящая ветвь у графиков всех трех образцов направлена под одним углом, тогда как ниспадающая ветвь с увеличением содержания заполнителя из сшитого полиэтилена становится более горизонтальной и пик диаграммы, соответствующий моменту разрушения, становится более сглаженным. Это подтверждает тот факт, что разрушение образцов с заполнителем из сшитого полиэтилена происходит более пластично, в момент пиковой нагрузки заполнитель некоторое время удерживает структуру образца от полного разрушения, в то время в образцах с минеральным заполнителем разрушение происходит хрупко (Рис.4).

(Table 3). This effect is explained by the different physical and chemical nature of the cement matrix and polymer waste and the low modulus of elasticity of this aggregate. In the case when the modulus of elasticity of the aggregate is greater than or equal to the modulus of elasticity of cement stone (sample LS-100), stress is transmitted through the aggregate, forming stress transmission lines, the filler acts as a frame. In the case of cross-linked polyethylene aggregate (PE-100 sample), its modulus of elasticity is lower than that of cement stone, so stress transfer occurs over more rigid sections of the mortar.

Based on the data obtained during the compression test, stress-strain graphs are constructed (Fig.3). The ascending branch of the graphs of all three samples is directed at the same angle, while the descending branch becomes more horizontal with an increase in the content of crosslinked polyethylene aggregate and the peak of the chart corresponding to the moment of destruction becomes more smoothed. This confirms the fact that the destruction of samples with an aggregate made of cross-linked polyethylene occurs more plastically; at the moment of peak load, the aggregate keeps the sample structure from complete destruction for some time, while in samples with a mineral aggregate, destruction occurs fragile (Fig.4).

РИСУНОК 3

ГРАФИКИ НАПРЯЖЕНИЯ-ДЕФОРМАЦИЙ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Figure 3

Stress-strain graphs of synthesized samples

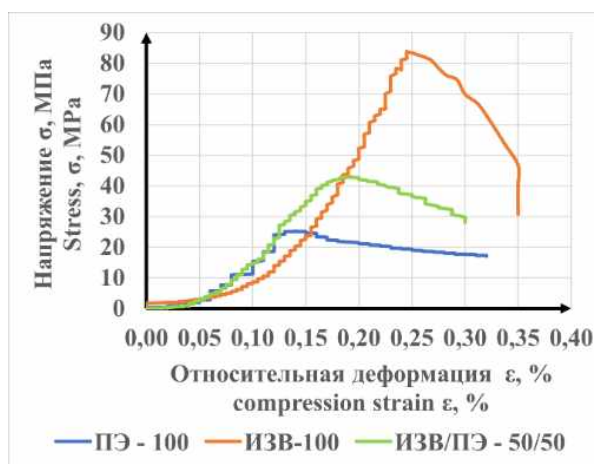


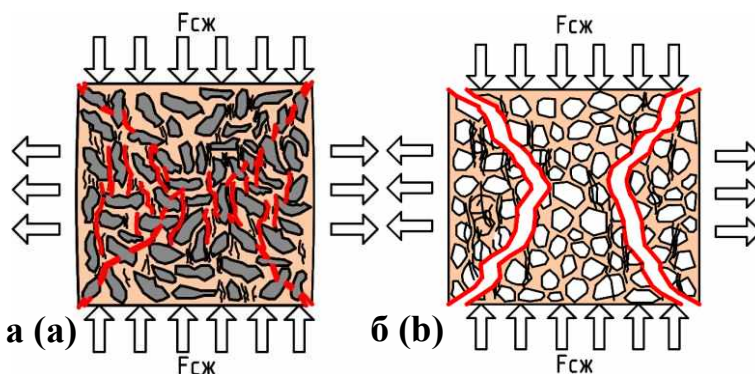
РИСУНОК 4

ХАРАКТЕР ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ПРИ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ

а – образец с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена (ПЭ-100);  
б – образец с минеральным заполнителем из отсевов дробления известняка (ИЗВ-100)

Figure 4

The nature of the destruction of samples  
a - sample with aggregate from waste of crosslinked polyethylene (PE-100);  
b - sample with mineral aggregate from dropout from limestone crushing (LS-100)



В представленном исследовании проведена оценка усадки синтезированных композиционных материалов и

In the presented study, the shrinkage of synthesized composite materials was evaluated and graphs of

построены графики усадочных деформаций (Рис. ). Исследование усадки было проведено в первые 60 суток твердения образцов. Для сравнения на рис.5 приведен график усадочных деформаций цементного камня с 20% заменой цемента на тонкомолотый порошок из отходов керамического кирпича.

Из представленных графиков видно, что наибольшей усадкой закономерно обладает образец цементного камня (ЦК). Также несколько меньшей, но всё ещё значительной усадкой обладает образец с заполнителем только из отходов сшитого полиэтилена (ПЭ-100). Это связано с пониженным модулем упругости такого заполнителя, который из-за низкой жесткости не может в полной мере сдерживать усадочные деформации цементного камня. В то же время образцы со смесью заполнителя из известняка и отходов сшитого полиэтилена (ИЗВ/ПЭ-50/50) показывают намного меньшую усадку на уровне с образца на основе только натурального природного известнякового заполнителя (ИЗВ-100).

shrinkage deformations were constructed (Fig.5). The shrinkage was studied during the first 60 days of sample hardening. For comparison, Fig.5 shows the graph of shrinkage deformations of cement stone with 20% cement replacement by finely ground powder from ceramic brick waste.

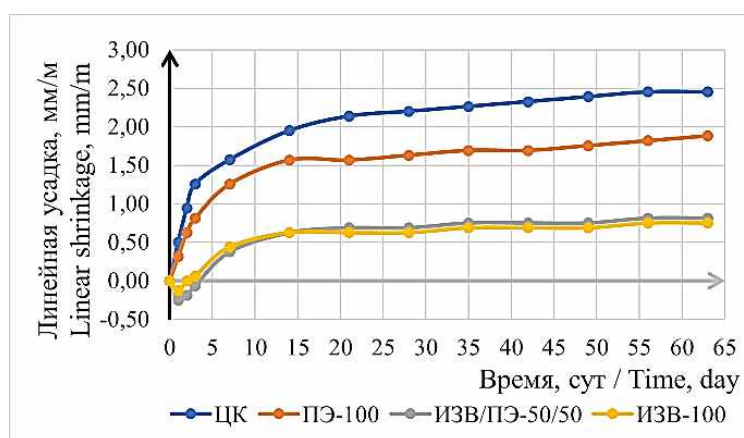
It can be seen from the presented graphs that the cement stone sample naturally has the greatest shrinkage. A sample with an aggregate made only of cross-linked polyethylene (PE-100) waste has a smaller, but still significant shrinkage. This is due to the reduced modulus of elasticity of such an aggregate, which, due to its low rigidity, cannot fully restrain the shrinkage deformations of cement stone. At the same time, samples with a mixture of limestone aggregate and waste cross-linked polyethylene (LS/PE-50/50) show a much lower shrinkage at the same level as the sample based only on natural limestone aggregate (LS-100).

РИСУНОК 5

ГРАФИКИ УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ

Figure 5

Graphs of shrinkage deformations synthesized material samples



На рис.6 представлены результаты испытания образцов синтезированных материалов на истираемость по ГОСТ 13087-2018. Из представленных результатов видно, что образцы с содержанием заполнителя из отходов сшитого полиэтилена (ПЭ-100 и ИЗВ/ПЭ-50/50) обладают намного большим сопротивлением истиранию чем образцы с натуральным природным заполнителем (ИЗВ-100). Такой эффект объясняется природой сшитого полиэтилена, который благодаря своей трехмерной структуре и поперечным связям в молекулах полимера в том числе обладает высокой износостойкостью.

Fig.6 shows the results of testing samples of synthesized materials for abrasion according to GOST 13087-2018. It can be seen from the presented results that samples containing aggregate from waste cross-linked polyethylene (PE-100 and LS/PE-50/50) have a much higher abrasion resistance than samples with natural aggregate (LS-100). This effect is explained by the nature of crosslinked polyethylene, which, due to its three-dimensional structure and transverse bonds in polymer molecules has high abrasion resistance.

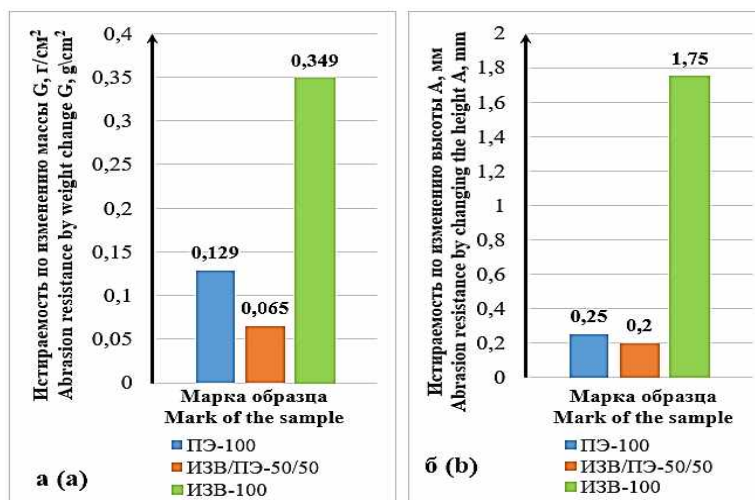
РИСУНОК 6

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИСТИРАЕМОСТЬ

а – диаграмма истираемости образцов по изменению массы;  
б – диаграмма истираемости образцов по изменению высоты

Figure 6

The results of testing samples of synthesized materials for abrasion  
a - diagram of the abrasion resistance of samples by weight change;  
b - diagram of the abrasion resistance of samples by height change



Проведена косвенная оценка морозостойкости образцов материала дилатометрическим способом. На рис.7 приведены графики зависимости абсолютных объёмных деформаций при замораживании испытуемых и стандартного образцов от времени.

An indirect assessment of the frost resistance of the material samples was carried out using a dilatometric method. Fig.7 shows graphs of the dependence of absolute volumetric deformations during freezing of the subjects and standard samples on time.

### РИСУНОК 7

#### ЗАВИСИМОСТИ АБСОЛЮТНЫХ ОБЪЁМНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ ИСПЫТУЕМЫХ И СТАНДАРТНОГО ОБРАЗЦОВ ОТ ВРЕМЕНИ

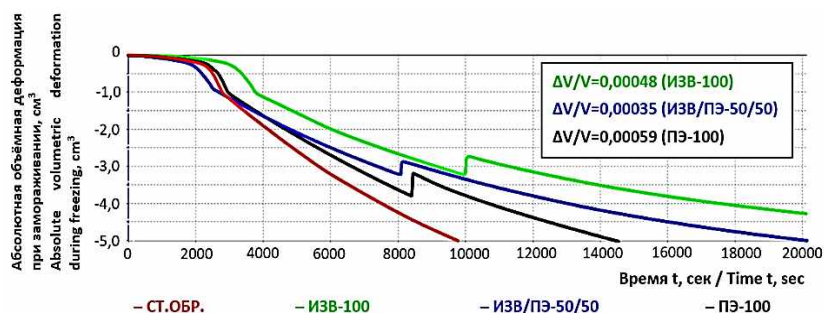


Figure 7

Time dependencies of absolute volumetric deformations during freezing of test and standard samples

Максимальное относительное увеличение разности объёмных деформаций составило 0,00048 (образец ИЗВ-100), 0,00035 (образец ИЗВ/ПЭ-50/50), 0,00059 (образец ПЭ-100). В соответствии ГОСТ 10060.3-95 данные результаты можно интерпретировать как марку по морозостойкости F300 во всех трех случаях. Стоит учитывать, что данный ГОСТ в настоящий момент не актуален и для точного установления марки по морозостойкости необходимо использовать стандартную методику. Тем не менее полученный результат позволяет полагать что полученные композиционные материалы обладают достаточно высокой морозостойкостью.

The maximum relative increase in the difference in volume deformations was 0.00048 (sample LS-100), 0.00035 (sample LS/PE-50/50), 0.00059 (sample PE-100). In accordance with GOST 10060.3-95, these results can be interpreted as the frost resistance mark F300 in all three cases. It should be borne in mind that this GOST is currently not relevant, and to accurately establish the mark for frost resistance, it is necessary to use a standard methodology. Nevertheless, the obtained result suggests that the obtained composite materials have a sufficiently high frost resistance.

На основании проведенных исследований и разработанных составов были синтезированы образцы декоративного материала с мозаичным, порфировым рисунком. Технология производства включала такие этапы как дозировка и перемешивание компонентов, формовка и распалубливание изделий, шлифовка поверхности для вскрытия структуры материала, шпатлевка пор и микродефектов, полировка и при необходимости покрытие поверхности защитными составами (лаками, пропитками, гидрофобизаторами). Данные изделия могут быть рекомендованы для применения в качестве декоративной напольной, интерьерной или тротуарной плитки. Внешний вид полученных изделий представлен на рис.8.

Based on the conducted research and the developed compositions, samples of decorative material with mosaic porphyry patterns were synthesized. The production technology included such steps as dosing and mixing of components, molding and demolding of products, surface grinding to reveal the structure of the material, filling of pores and microdefects, polishing and, if necessary, coating the surface with protective compounds (varnishes, impregnations, water repellents). These products can be recommended for use as decorative floor, interior or paving tiles. The appearance of the obtained products is shown in Fig.8.

### РИСУНОК 8

#### ВНЕШНИЙ ВИД ПОЛУЧЕННЫХ ДЕКОРАТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ



Figure 8

The appearance of the obtained decorative products

## Заклучение

Результаты проведенных исследований можно обобщить следующими основными выводами:

1. Включение в состав композиционного материала дробленых отходов из сшитого полиэтилена снижает текучесть и удобоукладываемость смеси в связи с неправильной формой и шероховатой поверхностью частиц такого заполнителя. Увеличивается трение частиц с цементным тестом и друг о друга и повышается количество цементного теста необходимого для обволакивания заполнителя.

2. Образцы с заполнителем из дробленых отходов сшитого полиэтилена обладают сниженной плотностью (1570 кг/м<sup>3</sup>), что связано с низкой плотностью самих полимерных отходов.

3. У образцов материала с заполнителем в виде отходов сшитого полиэтилена значительно снижены прочностные показатели, что связано с разной физико-химической природой цементной матрицы и заполнителя из полимерных отходов и низким модулем упругости последнего.

4. Разрушение образцов с заполнителем из сшитого полиэтилена происходит более пластично, в момент пиковой нагрузки заполнитель некоторое время удерживает структуру образца от полного разрушения, в то время как в образцах с минеральным заполнителем разрушение происходит хрупко.

5. Образцы с заполнителем только из отходов сшитого полиэтилена показали значительную усадку в первые 60 сут твердения. Это связано с пониженным модулем упругости такого заполнителя, который из-за низкой жесткости не может в полной мере сдерживать усадочные деформации цементного камня. В то же время намного меньшей усадкой обладают образцы со смесью заполнителя из известняка и отходов сшитого полиэтилена.

6. Образцы материала с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена обладают высоким сопротивлением истиранию. Такой эффект объясняется природой сшитого полиэтилена, который благодаря своей трехмерной структуре и поперечным связям в молекулах полимера в том числе обладает высокой износостойкостью.

7. На основании проведенной оценки морозостойкости dilatометрическим способом установлено, что полученные образцы обладают достаточно высокой морозостойкостью (марка F300).

8. Наилучшими свойствами по результатам исследований обладали образцы со смесью полимерного и минерального заполнителя. При достаточно высокой прочности такие образцы обладают повышенным сопротивлением истиранию, высокой морозостойкостью, сниженной плотностью и усадкой.

9. На основании проведенных исследований изготовлены и представлены декоративные изделия с порфировым рисунком, которые могут быть рекомендованы для применения в качестве декоративной напольной, интерьерной или тротуарной плитки.

## Литература:

1. Thomas J., Thomas M.E., Thomas S. Crosslinked Polyethylene: State-of-the-Art and New Challenges. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*. – 2021. – Pp.1–15. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_1).
2. Chandran N., Sivadas A., Anuja E., Baby D., Ramdas R. XLPE: Crosslinking Techniques and Recycling Process. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and*

## Conclusions

The results of the conducted research can be summarized by the following main conclusions:

1. The inclusion of crushed waste from crosslinked polyethylene in the composition of the composite material reduces the fluidity and workability of the mixture due to the irregular shape and rough surface of the particles of such an aggregate. The friction of the particles with the cement paste and against each other increases, and the amount of cement paste needed to coat the aggregate increases.

2. Samples with aggregate from crushed waste of crosslinked polyethylene have a reduced density (1,570 kg/m<sup>3</sup>), which is due to the low density of the polymer waste itself.

3. Samples of the material with an aggregate in the form of crosslinked polyethylene waste have significantly reduced strength indicators. This effect is explained by the different physical and chemical nature of the cement matrix and polymer waste and the low modulus of elasticity of this aggregate.

4. The destruction of samples with an aggregate made of crosslinked polyethylene occurs more plastically; at the moment of peak load, the aggregate protects the sample structure from complete destruction for some time, while in samples with a mineral aggregate, destruction occurs fragile.

5. The samples from only the crosslinked polyethylene waste aggregate showed significant shrinkage during the first 60 days of hardening. This is due to the reduced modulus of elasticity of such an aggregate, which, due to its low rigidity, cannot fully restrain the deformation of cement stone. At the same time, samples with a mixture of limestone aggregate and cross-linked polyethylene waste have much less shrinkage.

6. Material samples with aggregate from waste crosslinked polyethylene have high abrasion resistance. This effect is explained by the nature of cross-linked polyethylene, which, due to its three-dimensional structure and cross-links in polymer molecules, also has high abrasion resistance.

7. Based on the conducted assessment of frost resistance by the dilatometric method, it was found that the obtained samples have a sufficiently high frost resistance (mark F300).

8. Samples with a mixture of polymer and mineral aggregate had the best properties according to the results of the studies. With sufficiently high strength, such samples have increased abrasion resistance, high frost resistance, reduced density and shrinkage.

9. Based on the conducted research, decorative products with a porphyry pattern have been produced and presented, which can be recommended for use as decorative floor, interior or paving tiles.

## References:

1. Thomas J., Thomas M.E., Thomas S. Crosslinked Polyethylene: State-of-the-Art and New Challenges. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*. – 2021. – Pp.1–15. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_1).
2. Chandran N., Sivadas A., Anuja E., Baby D., Ramdas R. XLPE: Crosslinking Techniques and Recycling Process. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and*

- Applications. – 2021. – Pp. 167–188. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_7).
3. Чалов К.В., Луговой Ю.В., Косивцов Ю.Ю. Исследование кинетики термодеструкции сшитого полиэтилена // Бюллетень науки и практики. – 2019. – Т. 5, № 12. – С.37–46.
  4. Gonzalez J.S., Gaillarde F. L., Perez S.L.S., Ros P.S., Lopez M.A.S. Influence of recycled brick aggregates on the properties of structural concrete for the manufacture of precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – Pp. 507–514.
  5. Ahmad S.I., Hossain M.A. Water permeability characteristics of normal strength concrete made from crushed clay bricks as a coarse aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2017. – Pp. 109–119. <https://doi.org/10.1155/2017/7279138>.
  6. Zhao Y., Gao J., Liu C., Chen X., Xu Z. The partial-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. *Journal of cleaner production*. – 2020. – No.242. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>.
  7. Alsadey S. Properties of concrete using crushed brick as coarse aggregate // *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. – 2019. – Vol.6., No.3 – Pp. 44–47.
  8. Shao J., Gao J., Zhao, Y., Chen X. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. *Construction and Building Materials*. – 2019. – No.213. – Pp.209–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307>.
  9. Aliabdo A.A. Abd-Elmoati M., Hassan H.H. The use of crushed clay bricks in the concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 53. – No. 1. – Pp. 151–168. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>.
  10. Ge Z., Gao Z., Sun R., Zheng L. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. *Construction and building materials*. – 2012. – No.31. – Pp.289–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002>.
  11. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы использования отходов строительной керамики при производстве строительных материалов // *Техника и технология силикатов*. – 2024. – Т. 31, № 2. – С. 140–153. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-140-153>.
  12. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона // *Техника и технология силикатов*. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 247–261. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261>.
  13. Gu L., Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. Elsevier Ltd. – 2016. – No. 51. – Pp. 19–42. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630030412>.
  14. Thorneycroft J., Orr J., Savoikar P., Ball R.J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and building materials*. – 2018. – No.161. – Pp.63–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>.
  15. Galvão J. C. A., Portella K. F., Joukoski A., Mendes R., & Ferreira, E. S. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol.25, No.2. – Pp.1049–1055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.0>.
  16. Oti J., Adeleke B.O., Rathnayake M., Kinuthia J. M., Ekwulo E. Strength and Durability Characterization of Structural Concrete Made of Recycled Plastic // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 8. <https://doi.org/10.3390/ma17081841>.
  17. Hu S., Tang H., Han S. Energy Absorption Characteristics of PVC Coarse Aggregate Concrete under Impact Load // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2021. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00465-w>.
  18. Ghernouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plasticsbag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2012. – Vol.6, No.3. – Pp.145–153. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0013-0>.
  19. Zéhil G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials. *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285>.
- Applications. – 2021. – Pp. 167–188. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_7).
3. Chalov K.V., Lugovoj Yu.V., Kosivcov Yu.Yu. Investigation of the kinetics of thermal degradation of cross-linked polyethylene // *Byulleten' nauki i praktiki*. – 2019. – Vol. 5, No.12. – Pp. 37–46.
  4. Gonzalez J.S., Gaillarde F. L., Perez S.L.S., Ros P.S., Lopez M.A.S. Influence of recycled brick aggregates on the properties of structural concrete for the manufacture of precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – Pp. 507–514.
  5. Ahmad S.I., Hossain M.A. Water permeability characteristics of normal strength concrete made from crushed clay bricks as a coarse aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2017. – Pp. 109–119. <https://doi.org/10.1155/2017/7279138>.
  6. Zhao Y., Gao J., Liu C., Chen X., Xu Z. The partial-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. *Journal of cleaner production*. – 2020. – No.242. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>.
  7. Alsadey S. Properties of concrete using crushed brick as coarse aggregate // *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. – 2019. – Vol.6., No.3 – Pp. 44–47.
  8. Shao J., Gao J., Zhao, Y., Chen X. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. *Construction and Building Materials*. – 2019. – No.213. – Pp.209–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307>.
  9. Aliabdo A.A. Abd-Elmoati M., Hassan H.H. The use of crushed clay bricks in the concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 53. – No. 1. – Pp. 151–168. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>.
  10. Ge Z., Gao Z., Sun R., Zheng L. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. *Construction and building materials*. – 2012. – No.31. – Pp.289–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002>.
  11. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Prospects for the use of construction ceramics waste in the production of building materials // *Engineering and Technology of Silicates* – 2024. Vol. – 31, No2. – Pp. 140 – 153. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-140-153>.
  12. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Prospects for the use of polymer waste as concrete aggregates // *Engineering and Technology of Silicates*. – 2024. Vol. – 31, No-3. – Pp. 247 – 261, <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261>.
  13. Gu L., Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. Elsevier Ltd. – 2016. – No. 51. – Pp. 19–42. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630030412>.
  14. Thorneycroft J., Orr J., Savoikar P., Ball R.J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and building materials*. – 2018. – No.161. – Pp.63–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>.
  15. Galvão J. C. A., Portella K. F., Joukoski A., Mendes R., & Ferreira, E. S. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol.25, No.2. – Pp.1049–1055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.0>.
  16. Oti J., Adeleke B.O., Rathnayake M., Kinuthia J. M., Ekwulo E. Strength and Durability Characterization of Structural Concrete Made of Recycled Plastic // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 8. <https://doi.org/10.3390/ma17081841>.
  17. Hu S., Tang H., Han S. Energy Absorption Characteristics of PVC Coarse Aggregate Concrete under Impact Load // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2021. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00465-w>.
  18. Ghernouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plasticsbag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2012. – Vol.6, No.3. – Pp.145–153. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0013-0>.
  19. Zéhil G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials. *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285>.

- Building Materials. – 2019. – Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285>.
20. Yesilata B., Isiker Y., Turgut P. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23, No.5. – Pp.1878–1882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014>

*Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-03-2024-112 от 17.01.2024г.).*

*The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of VISU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-03-2024-112 of January 17, 2024).*

**Баруздин Александр Андреевич** – аспирант кафедры «Строительное производство», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ),  
E-mail: [baruzdin98@bk.ru](mailto:baruzdin98@bk.ru) (автор для связи)

**Закревская Любовь Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), E-mail: [lvzak@mail.ru](mailto:lvzak@mail.ru)

**Доброхотов Владимир Борисович** – кандидат химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (ЯГТУ), E-mail: [dobrokhotovvb@yandex.ru](mailto:dobrokhotovvb@yandex.ru)

**Вклад авторов:** Закревская Л.В. – научное руководство, научное редактирование статьи; Баруздин А.А. – идея, проведение эксперимента, обработка материала, написание статьи; Доброхотов В.Б. – анализ морозостойкости dilatометрическим методом.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Baruzdin Aleksandr Andreevich** – Postgraduate student of «Construction production» department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (VISU),  
E-mail: [baruzdin98@bk.ru](mailto:baruzdin98@bk.ru) (author for contact)

**Zakrevskaya Lyubov Vladimirovna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (VISU),  
E-mail: [lvzak@mail.ru](mailto:lvzak@mail.ru)

**Dobrokhotov Vladimir Borisovich** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Yaroslavl State Technical University, E-mail: [dobrokhotovvb@yandex.ru](mailto:dobrokhotovvb@yandex.ru)

**Contribution of the author:** Zakrevskaya L.V. – scientific guidance, scientific editing of the article; Baruzdin A.A. – idea, conducting an experiment, processing of material, writing of the article; Dobrokhotov V.B. – analysis of frost resistance by the dilatometric method.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

УДК 666.942.31

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.35.33

Научная специальность ВАК: 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)

EDN yyoamn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-446-455

## ВЛИЯНИЕ ДВУВОДНОГО ГИПСА И ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА СУЛЬФОАЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ

Тхет Наинг Мьинг<sup>1</sup>, Хтет Паинг Аунг<sup>1</sup>, Кривобородов Ю.Р.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

### АННОТАЦИЯ

В рамках проведенного исследования была выполнена комплексная оценка влияния химических добавок-пластификаторов различной природы на реологические и физико-механические свойства специальных цементных систем на основе сульфатоалюминатного клинкера. В качестве объектов исследования выступили суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров MELMENT F10 и гиперпластификатор нового поколения MELFLUX 4930F. Исследование включало варьирование двух ключевых параметров: вида и дозировки пластифицирующей добавки, а также количества двуводного гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), вводимого в состав вяжущего. Гипс играет критическую роль в регулировании кинетики твердения и формирования конечной структуры сульфатоалюминатного цемента. В результате проведенных экспериментов была установлена четкая зависимость между природой добавки и строительно-техническими характеристиками композитов. Гиперпластификатор MELFLUX 4930F продемонстрировал существенно более высокую эффективность по сравнению с суперпластификатором MELMENT F10. Его применение обеспечивало значительное снижение водопотребности смесей при одновременном улучшении удобоукладываемости, что положительно сказалось на плотности и прочности затвердевшего камня. По совокупности полученных данных (прочность на сжатие и изгиб, нормальная плотность цементного теста, сроки схватывания) был определен оптимальный рецептурный состав. Наилучшие результаты зафиксированы для композиции, содержащей 5% двуводного гипса от массы вяжущего и 0,5% гиперпластификатора MELFLUX 4930F. Именно данное сочетание обеспечило формирование цементного камня с максимальными показателями прочности на ранних и поздних сроках твердения, а также с высокой плотностью и долговечностью.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сульфатоалюминатный клинкер, природный гипсовый камень, пластифицирующие добавки, нормальная плотность, сроки схватывания

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тхет Наинг Мьинг, Хтет Паинг Аунг, Кривобородов Ю.Р. Влияние двуводного гипса и пластифицирующих добавок на свойства сульфатоалюминатных цементов // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 446-455. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-446-455>, EDN yyoamn

Type of article - scientific article

OECD 2.04 Chemical engineering

II ENGINEERING, CHEMICAL

EDN yyoamn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-446-455

## THE INFLUENCE OF GYPSUM DIHYDRATE AND PLASTICIZING ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF SULFOALUMINATE CEMENTS

Thet Naing Myint<sup>1</sup>, Htet Paing Aung<sup>1</sup>, Krivoborodov Yu.R.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RSTU)

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University

### ABSTRACT

Within the framework of the conducted research, a comprehensive assessment of the influence of chemical plasticizing additives of different natures on the rheological and physico-mechanical properties of special cement systems based on calcium sulfoaluminate clinker was performed. The objects of the study were the polycarboxylate ether-based superplasticizer MELMENT F10 and the new generation hyperplasticizer MELFLUX 4930F. The study involved varying two key parameters: the type and dosage of the plasticizing additive, and the amount of dihydrate gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) introduced into the binder composition. Gypsum plays a critical role in regulating the hardening kinetics and the formation of the final structure of calcium sulfoaluminate cement. As a result of the experiments, a clear dependence between the nature of the additive and the construction-technical characteristics of the composites was established. The hyperplasticizer MELFLUX 4930F demonstrated significantly higher efficiency compared to the superplasticizer MELMENT F10. Its application provided a significant reduction in the water demand of the mixtures while simultaneously improving workability, which positively affected the density and strength of the hardened paste. Based on the totality of the obtained data (compressive and flexural strength, standard consistency of cement paste, setting times), the optimal formulation composition was determined. The best results were recorded for the composition containing 5% dihydrate gypsum by weight of the binder and 0.5% hyperplasticizer MELFLUX 4930F. This particular combination ensured the formation of a cement paste with maximum strength indicators at early and late hardening ages, as well as high density and durability.

**KEY WORDS:** sulfoaluminate clinker, natural gypsum stone, plasticizing additives, standard consistency, setting times

**FOR CITATION:** Thet Naing Myint, Htet Paing Aung, Krivoborodov Yu.R. The influence of gypsum dihydrate and plasticizing additives on the properties of sulfoaluminate cements // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 446–455. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-446-455>, EDN yyoamn.

## ВВЕДЕНИЕ

В данный период времени, многих сильно заботит положение окружающей среды, в цементной индустрии особенно немаловажно наблюдать за выбросами, так как страны постоянно нуждаются в цементе и его производство никогда не прервется. Более дорогостоящим компонентом в составе САК являются бокситы или для полного понимания – алюминиевые руды. Однако существуют альтернативные источники данного сырья (отходы металлургии цветных металлов, пиритовые золы). В сульфоалюминатных цементах допустимо применение техногенных материалов, что даст возможность рационально использовать природные ресурсы, гарантировать более дешевое производство, сократить выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу найти решение утилизации промышленных отходов [1-7].

В определенных случаях, при использовании высокоалюминатных цементов потребление водоредуцирующих добавок увеличивается, а их результативность уменьшается. Возможно, вероятная причина данного явления – проникновение и адсорбция молекул водоредуцирующей добавки в межслоевое пространство  $\text{AF}_m$ -фаз, к которым относятся большинство гидроалюминатов кальция [8-14].

В настоящий период времени вопрос сочетаемости водоредуцирующих добавок со специальными цементами пока недостаточно исследован. Однако, отталкиваясь от факта, что при гидратации сульфатированных цементов также возможно образование  $\text{AF}_m$ -фаз, следует выполнить широкие исследования в этом направлении [10, 15-17].

Таким образом, целью данной работы станет изучение САК на основе техногенных материалов, а также совместимости разных по химическому составу смесей САЦ с различными пластификаторами и установление целесообразности этих методов упрочнения цементной смеси.

**Целью работы** является исследование влияния пластификаторов различной природы на нормальную плотность и сроки схватывания специальных цементов на основе сульфоалюминатного клинкера с различной дозировкой двуводного гипса.

### Материалы и методы

Для синтеза опытных образцов цементов была сформирована сырьевая база, включающая следующие компоненты:

**Сульфоалюминатный клинкер** — являлся основным вяжущим компонентом. В работе применялся клинкер промышленного производства, полученный на мощностях АО "Подольский цементный завод". Его химико-минералогический состав, характеризующийся преобладанием белитовой ( $\text{C}_2\text{S}$ ) и сульфоалюминатной ( $\text{C}_4\text{A}_3\hat{\text{S}}$ ) фаз, обеспечивает базовые свойства специальных цементов: регулируемую кинетику твердения, высокую раннюю прочность и стойкость к специфическим средам.

**Сульфатосодержащий компонент** — в качестве регулятора структуры и сроков схватывания использовался природный двуводный гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), отобранный на Новомосковском месторождении. Выбор данного сырья обусловлен его высокой чистотой и стабильностью кристаллохимических характеристик, что критически важно для воспроизводимости процессов гидратации сульфоалюминатной фазы и формирования устойчивого этtringита.

**Модифицирующие добавки** — для целенаправленного регулирования реологических и технологических

## INTRODUCTION

Currently, many are deeply concerned about the state of the environment. In the cement industry, it is particularly important to monitor emissions, as countries constantly need cement and its production will never cease. The more expensive component in the composition of calcium sulfoaluminate clinker (CSA) is bauxite or, for a complete understanding, aluminum ores. However, there are alternative sources of this raw material (non-ferrous metallurgy waste, pyrite cinders). The use of technogenic materials in calcium sulfoaluminate cements is permissible, which will allow for the rational use of natural resources, guarantee cheaper production, reduce  $\text{CO}_2$  emissions into the atmosphere, and provide a solution for the disposal of industrial waste [1-7].

In certain cases, when using high-alumina cements, the consumption of water-reducing additives increases, and their effectiveness decreases. A probable reason for this phenomenon is the penetration and adsorption of water-reducing additive molecules into the interlayer space of  $\text{AF}_m$  phases, which include most calcium hydroaluminates [8-14].

At present, the issue of compatibility of water-reducing additives with special cements is still insufficiently researched. However, based on the fact that the hydration of sulfated cements can also lead to the formation of  $\text{AF}_m$  phases, extensive research in this direction should be carried out [10, 15-17].

Thus, the aim of this work is to study CSA cements based on technogenic materials, as well as the compatibility of CSA mixtures of different chemical compositions with various plasticizers and to establish the feasibility of these methods for strengthening the cement mixture.

**The aim of the work** is to study the influence of plasticizers of different natures on the standard consistency and setting times of special cements based on calcium sulfoaluminate clinker with different dosages of dihydrate gypsum.

### Materials and Methods

For the synthesis of experimental cement samples, a raw material base was formed, including the following components:

**Calcium Sulfoaluminate Clinker** - was the main binding component. Industrially produced clinker from JSC "Podolsk Cement Plant" was used. Its chemical and mineralogical composition, characterized by the predominance of belite ( $\text{C}_2\text{S}$ ) and calcium sulfoaluminate ( $\text{C}_4\text{A}_3\hat{\text{S}}$ ) phases, provides the basic properties of special cements: controllable hardening kinetics, high early strength, and resistance to specific environments.

**Sulfate-containing component** - natural dihydrate gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) from the Novomoskovsk deposit was used as a structure and setting time regulator. The choice of this raw material is due to its high purity and stability of crystallochemical characteristics, which is critical for the reproducibility of calcium sulfoaluminate phase hydration processes and the formation of stable ettringite.

свойств цементных систем вводились высокоэффективные пластификаторы:

**Суперпластификатор «Melment F10»** — поликарбоксилатный эфир (ПКЭ) стандартной эффективности, служащий эталоном для сравнительного анализа.

**Гиперпластификатор «Melflux 4930F»** — представитель нового поколения поликарбоксилатных эфиров с комбинированным действием, обеспечивающий не только значительное водоредуцирование, но и контроль реологических свойств и кинетики гидратации.

**Modifying additives** - to purposefully regulate the rheological and technological properties of cement systems, high-efficiency plasticizers were introduced:

**Superplasticizer "Melment F10"** - a standard efficiency polycarboxylate ether (PCE), serving as a reference for comparative analysis.

**Hyperplasticizer "Melflux 4930F"** - a representative of a new generation of polycarboxylate ethers with combined action, providing not only significant water reduction but also control of rheological properties and hydration kinetics.

**ТАБЛИЦА 1 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
**Table 1 Chemical composition of raw materials**

Материалы Materials	Содержание оксидов, масс. % Oxide Content, wt. %						
	п.п.п I.O.I	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
САК Calcium Sulfoaluminate Clinker	0,50	10,50	26,10	5,53	51,30	1,30	4,60
Гипсовый камень Gypsum	23,1	2,40	0,50	0,30	32,20	2,60	38,90

На первом этапе работы исследовалось влияние добавок двуводного гипса на нормальную густоту и сроки схватывания цемента на основе сульфоалюминатного клинкера АО «Подольский Цемент».

**Получение цементов на основе САК с различным содержанием гипса**

Было получено 3 состава САК для исследований нормальной густоты и сроков схватывания.

Составы:

Чистый САК

САК+5% гипса

САК+15% гипса

Каждой смеси было получено по 2700 г, смеси мешались на специальных волках по 30 минут, для получения однородной массы.

Далее смеси были разбиты на 9 частей по 300 г:

Чистый САК

Чистый САК + 0,5% пластификатора

Чистый САК +1% пластификатора

САК +5% гипса

САК +5% гипса +0,5% пластификатора

САК +5% гипса +1% пластификатора

САК +15% гипса

САК +15% гипса +0,5% пластификатора

САК +15% гипса +1% пластификатора

Так как в работе исследуется 2 пластификатора, то в итоге были изучены 18 смесей.

Каждая смесь была исследована на выявление оптимального водоцементного соотношения (НГ), выявления сроков схватывания, прочностных характеристик и сделан РФА.

**Определение нормальной густоты и сроков схватывания цементов**

**Определение нормальной густоты**

За нормальную густоту цементного теста принимают количество воды затворения, выраженное в процентах

In the first stage of the work, the influence of dihydrate gypsum additives on the standard consistency and setting times of cement based on calcium sulfoaluminate clinker from JSC "Podolsk Cement" was investigated.

**Preparation of CSA-based cements with different gypsum content**

Three CSA compositions were prepared for studying standard consistency and setting times.

Compositions:

Pure CSA Clinker

CSA + 5% gypsum

CSA + 15% gypsum

2700 g of each mixture was prepared; the mixtures were mixed in special mills for 30 minutes to obtain a homogeneous mass.

Subsequently, the mixtures were divided into 9 parts of 300 g each:

Pure CSA Clinker

Pure CSA Clinker + 0.5% Melment F10

Pure CSA Clinker + 0.5% Melflux 4930F

CSA + 5% gypsum

CSA + 5% gypsum + 0.5% Melment F10

CSA + 5% gypsum + 0.5% Melflux 4930F

CSA + 15% gypsum

CSA + 15% gypsum + 0.5% Melment F10

CSA + 15% gypsum + 0.5% Melflux 4930F

Since the study examined two plasticizers, 18 mixtures were ultimately studied.

Each mixture was tested to determine the optimal water-cement ratio (WCR), setting time, strength characteristics, and X-ray fluorescence analysis (XRF).

**Determining the normal density and setting time of cements**

**Determining the normal density**

The normal consistency of cement paste is defined as the amount of mixing water, expressed as a percentage of the

от массы цемента, при котором достигается нормированная консистенция цементного теста.

Нормальную густоту определяют по ГОСТ 310.3-76 на малом приборе Вика.

**Малый прибор Вика** отличается от стандартного массой подвижной части, которая составляет 70 г, а также размерами пестика ( $d = 4,5$  мм и  $l = 20$  мм) и иглы ( $d = 0,5$  мм и  $l = 25$  мм). При работе с малым прибором Вика используют коническую форму с нижним диаметром 30 мм, верхним диаметром 25 мм и высотой 15 мм.

Для определения нормальной густоты цементного теста отвешивают

20 г цемента и помещают навеску в фарфоровую чашку со сферическим днищем.

Затем отмеряют мерным цилиндром необходимое количество дистиллированной воды. Пластику с кольцом и цементным тестом помещают в прибор Вика.

Пестик подводят к поверхности теста и фиксируют стопорным винтом. Затем отпускают стопорный винт и дают пестику свободно погружаться в цементное тесто в течение 10 с.

За нормальную густоту цементного теста принимают такую его консистенцию, при которой пестик не доходит до дна кольца на 3-4 мм.

Если пестик погружается ниже (выше) 3-4 мм, замешивают новую порцию цемента и опыт повторяют, уменьшая (увеличивая) количество воды на 1-5 %. Поверхность пестика, кольца и пластинки после каждого опыта протирают влажной ветошью и слегка смазывают машинным маслом.

Нормальную густоту (НГ, в %) рассчитывают по формуле:

$$НГ = \frac{W}{m} \cdot 100\%, \text{ где}$$

W – количество воды затворения, мл;

m – навеска гидравлического вяжущего, г.

#### **Определение сроков схватывания**

Необратимый процесс потери подвижности бетона или цементно-песчаного раствора называется – время схватывания цемента. Это важный, нормируемый показатель качества для всех общестроительных цементов

При определении сроков схватывания цементного теста в нижнюю часть стержня прибора Вика вставляют иглу. Пестик перемещают в верхнюю часть прибора.

Для определения сроков схватывания иглу подводят к поверхности теста и фиксируют винтом, после чего отпускают стопорный винт и дают игле свободно погружаться в цементное тесто в течение 10с. Производят отсчет глубины погружения иглы в цементное тесто. Если игла касается дна, то повторяют измерение глубины ее погружения через 5 мин в другом месте, слегка повернув кольцо. После каждого измерения необходимо протирать иглу от цементного теста.

За начало сроков схватывания принимают время от момента затворения цемента водой до того момента, когда игла не будет доходить до дна формы на 1-2 мм.

За конец схватывания принимают время от момента затворения водой, до момента, когда игла будет погружаться в цементное тесто не более чем на 1-2 мм.

cement mass, that achieves the specified consistency of the cement paste.

Normal consistency is determined according to GOST 310.3-76 using a small Vicat apparatus.

The small Vicat apparatus differs from the standard one in the mass of the moving part, which is 70 g, as well as the dimensions of the plunger ( $d = 4.5$  mm and  $l = 20$  mm) and the needle ( $d = 0.5$  mm and  $l = 25$  mm). When working with the small Vicat apparatus, a conical ring with a bottom diameter of 30 mm, a top diameter of 25 mm, and a height of 15 mm is used.

To determine the standard consistency of cement paste, 20 g of cement is weighed and placed in a porcelain bowl with a spherical bottom.

Then the necessary amount of distilled water is measured with a measuring cylinder. The plate with the ring and cement paste is placed in the Vicat apparatus.

The plunger is brought to the surface of the paste and fixed with a locking screw. Then the locking screw is released, and the plunger is allowed to freely immerse into the cement paste for 10 s.

The standard consistency of the cement paste is taken as its consistency at which the plunger does not reach the bottom of the ring by 3-4 mm.

If the plunger immerses below (above) 3-4 mm, a new portion of cement is mixed, and the experiment is repeated, decreasing (increasing) the amount of water by 1-5%. The surface of the plunger, ring, and plate after each experiment is wiped with a damp cloth and lightly lubricated with machine oil.

The standard consistency (SC, in %) is calculated by the formula:

$$SC = \frac{W}{m} \cdot 100\%, \text{ where}$$

W – amount of mixing water, ml;

m - mass of hydraulic binder, g.

#### **Determination of setting times**

The irreversible process of loss of mobility of concrete or cement-sand mortar is called the setting time of cement. This is an important, standardized quality indicator for all general construction cements.

When determining the setting times of cement paste, the needle is inserted into the lower part of the Vicat apparatus rod. The plunger is moved to the upper part of the apparatus.

To determine the setting times, the needle is brought to the surface of the paste and fixed with a screw, after which the locking screw is released, and the needle is allowed to freely immerse into the cement paste for 10 s. The depth of needle immersion into the cement paste is recorded. If the needle touches the bottom, the measurement of its immersion depth is repeated after 5 minutes in another place, slightly turning the ring. After each measurement, the needle must be wiped clean of cement paste.

The initial setting time is taken as the time from the moment of cement mixing with water until the moment when the needle does not reach the bottom of the mold by 1-2 mm.

The final setting time is taken as the time from the moment of mixing with water until the moment when the needle immerses into the cement paste by no more than 1-2 mm.

## Результаты и их обсуждение

Цементы с добавками гипса готовились методом перемешивания. Определение нормальной густоты и сроков схватывания цементов проводили с использованием малого прибора Вика в соответствии с методиками. Результаты определения нормальной густоты цементов, измельченных до удельной поверхности 400 м<sup>2</sup>/кг, при различных соотношениях САК и двуводного гипса CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O представлены в таблице 2.

## Results and Discussion

Cements with gypsum additives were prepared by mixing. Determination of standard consistency and setting times of cements was carried out using a small Vicat apparatus according to standard methods. The results of determining the standard consistency of cements, ground to a specific surface area of 400 m<sup>2</sup>/kg, at different ratios of CSA and dihydrate gypsum CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O are presented in Table 2.

ТАБЛИЦА 2 ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ГИПСА НА НОРМАЛЬНУЮ ГУСТОТУ И СРОКИ СХВАТЫВАНИЯ СУЛЬФОАЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ

Table 2 Influence of gypsum additives on standard consistency and setting times of calcium sulfoaluminate cements

Содержание гипса в цементе, масс. % Gypsum content in cement, wt. %	Нормальная густота, % Normal density, %	Сроки схватывания, мин Setting time, min	
		начало beginning	конец end
0	40	10	15
5	35	20	35
15	30	30	70

Установлено, что нормальная густота сульфoалюминатного цемента уменьшается при введении в его состав добавок двуводного гипса с 40 % (0 масс.% гипса) до 35 и 30 % в случае введения в его состав 5 и 15 масс.% гипса соответственно. Данное явление можно объяснить тем, что в присутствии гипса образуются крупные кристаллы этtringита 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, адсорбирующие меньшее количество воды, чем образующиеся в отсутствие гипса кристаллы AF<sub>m</sub>- фаз (гидроалюминаты кальция различного состава).

Установлено, что сроки схватывания сульфoалюминатного цемента удлиняются при введении в его состав добавок двуводного гипса: начало схватывания – с 10 мин (0 масс.% гипса) до 20 и 30 мин в случае введения в его состав 5 и 15 масс.% гипса соответственно; конец схватывания – соответственно с 15 до 35 – 70 мин. Замедление схватывания цементов в присутствии добавок гипса можно объяснить образованием плотных, малопроницаемых для молекул воды оболочек из кристаллов этtringита, снижающих скорость гидратации цемента

Результаты исследования совместного влияния двуводного гипса и пластифицирующих добавок Melment F10 и Melflux 4930F на нормальную густоту сульфoалюминатного цемента представлены на рисунках 1 и 2.

С ростом содержания двуводного гипса в цементе эффективность действия обоих пластификаторов снижается. Так, для раствора с 0,5 масс.% пластификатора Melment F10 нормальная густота цемента с 5 масс.% гипса составляет 23,5 %, а для цемента с 15 масс.% гипса – 25,0 %. Для раствора с 0,5 масс.% пластификатора Melflux 4930F нормальная густота цемента с 5 масс.% гипса составляет 17,5 %, а для цемента с 15 масс.% гипса – 20,0 %.

Данное явление можно объяснить адсорбцией части пластификатора на частицах гипса: чем больше гипса в системе, тем большее количество пластификатора адсорбируется на гипсе и тем меньшее количество

It was found that the standard consistency of calcium sulfoaluminate cement decreases when dihydrate gypsum additives are introduced into its composition from 40% (0 wt.% gypsum) to 35% and 30% in the case of introducing 5 and 15 wt.% gypsum, respectively. This phenomenon can be explained by the fact that in the presence of gypsum, large crystals of ettringite 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O are formed, which adsorb less water than the AF<sub>m</sub> phase crystals (calcium hydroaluminates of various compositions) formed in the absence of gypsum.

It was found that the setting times of calcium sulfoaluminate cement are prolonged when dihydrate gypsum additives are introduced into its composition: initial setting increases from 10 min (0 wt.% gypsum) to 20 and 30 min in the case of introducing 5 and 15 wt.% gypsum, respectively; final setting increases from 15 min to 35 and 70 min, respectively. The retardation of cement setting in the presence of gypsum additives can be explained by the formation of dense, low-permeability shells of ettringite crystals, which reduce the rate of cement hydration.

The results of the study of the combined influence of dihydrate gypsum and plasticizing additives Melment F10 and Melflux 4930F on the standard consistency of calcium sulfoaluminate cement are presented in Figures 1 and 2.

With an increase in the dihydrate gypsum content in the cement, the effectiveness of both plasticizers decreases. Thus, for a mixture with 0.5 wt.% plasticizer Melment F10, the standard consistency of cement with 5 wt.% gypsum is 23.5%, and for cement with 15 wt.% gypsum, it is 25.0%. For a mixture with 0.5 wt.% plasticizer Melflux 4930F, the standard consistency of cement with 5 wt.% gypsum is 17.5%, and for cement with 15 wt.% gypsum, it is 20.0%.

This phenomenon can be explained by the adsorption of part of the plasticizer on gypsum particles: the more gypsum in the system, the greater the amount of plasticizer adsorbed on the gypsum and the lesser amount of plasticizer participates in the plasticization of the calcium sulfoaluminate mixture.

пластификатора участвует в пластификации раствора сульфоалюмината.

Результаты исследования совместного влияния двуводного гипса и пластифицирующих добавок Melment F10 и Melflux 4930F сроки схватывания сульфоалюминатного цемента представлены на рисунке 3.

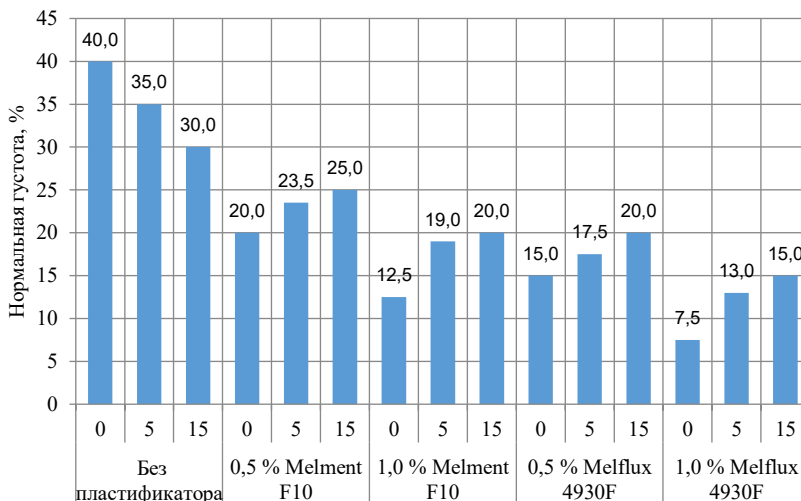
The results of the study of the combined influence of dihydrate gypsum and plasticizing additives Melment F10 and Melflux 4930F on the setting times of calcium sulfoaluminate cement are presented in Figure 3.

**РИСУНОК 1**

**НОРМАЛЬНАЯ ГУСТОТА ЦЕМЕНТОВ**

Figure 1

Standard consistency of cements

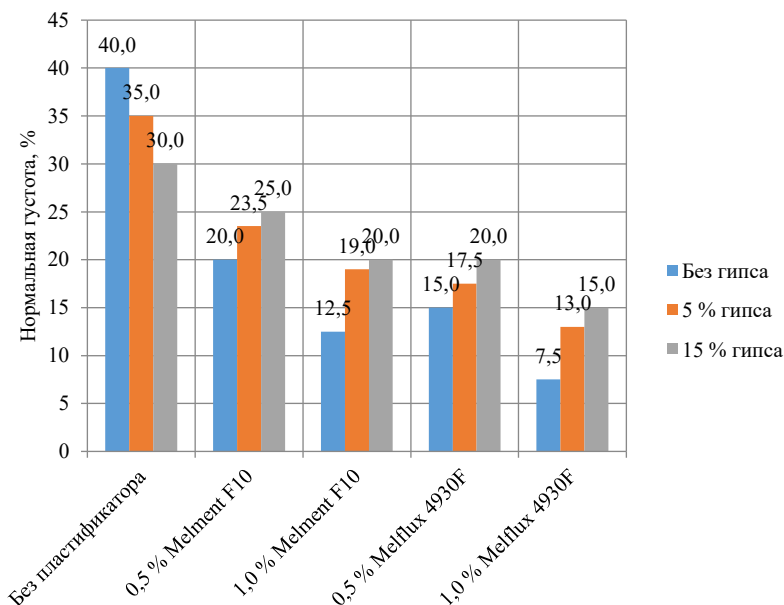


**РИСУНОК 2**

**ВЛИЯНИЕ ДВУВОДНОГО ГИПСА НА НОРМАЛЬНУЮ ГУСТОТУ ЦЕМЕНТОВ**

Figure 2

Influence of dihydrate gypsum on the standard consistency of cements



Установлено, что сроки схватывания сульфоалюминатного цемента удлиняются при введении в его состав добавок двуводного гипса: начало схватывания – с 10 мин (0 масс.% гипса) до 20 и 30 мин в случае введения в его состав 5 и 15 масс.% гипса соответственно; конец схватывания – соответственно с 15 до 35 – 70 мин.

Замедление схватывания цементов в присутствии добавок гипса можно объяснить образованием плотных, малопроницаемых для молекул воды оболочек из кристаллов этtringита, снижающих скорость гидратации цемента. Первичной причиной снижения эффективности

It was found that the setting times of calcium sulfoaluminate cement are prolonged when dihydrate gypsum additives are introduced into its composition: initial setting increases from 10 min (0 wt.% gypsum) to 20 and 30 min in the case of introducing 5 and 15 wt.% gypsum, respectively; final setting increases from 15 min to 35 and 70 min, respectively.

The retardation of cement setting in the presence of gypsum additives can be explained by the formation of dense, low-permeability shells of ettringite crystals, which reduce the rate of cement hydration. The primary reason

пластификаторов является конкурентная адсорбция. Молекулы поликарбоксилатных эфиров (ПКЭ) адсорбируются не только на поверхностях клинкерных фаз ( $C_4A_3\hat{S}$ ,  $C_2S$ ), но и на высокорективных поверхностях частиц двуводного гипса. При повышенном содержании гипса значительная доля введенного пластификатора иммобилизуется на его поверхности, что снижает количество активного вещества, доступного для диспергирования клинкера. Таким образом, «рабочая» концентрация пластификатора в системе падает, что и приводит к снижению водоредуцирующего эффекта.

Замедляющее действие гипса объясняется формированием на поверхности зерен клинкера плотного, низкопроницаемого барьерного слоя из ранних этtringитовых фаз ( $AF_t$ ). Этот слой экранирует поверхность частиц цемента, затрудняя диффузию воды и ионов к непрореагировавшему ядру, и тем самым значительно тормозит дальнейшие процессы гидратации. Чем выше концентрация гипса, тем более сплошной и плотный образуется этtringитовый барьер, что и приводит к более значительной задержке схватывания.

Введение добавок пластификаторов в растворы на основе сульфоалюминатного цемента, не содержащего гипса, также приводит к удлинению сроков схватывания цемента: начало схватывания увеличивается с 10 до 17–20 мин для Melment F10 и до 14–20 мин для Melflux 4930F.

for the decrease in the effectiveness of plasticizers is competitive adsorption. The molecules of polycarboxylate ethers (PCE) are adsorbed not only on the surfaces of clinker phases ( $C_4A_3\hat{S}$ ,  $C_2S$ ) but also on the highly reactive surfaces of dihydrate gypsum particles. With increased gypsum content, a significant portion of the introduced plasticizer is immobilized on its surface, which reduces the amount of active substance available for dispersing the clinker. Thus, the "working" concentration of the plasticizer in the system drops, which leads to a decrease in the water-reducing effect.

The retarding effect of gypsum is explained by the formation of a dense, low-permeability barrier layer of early ettringite phases ( $AF_t$ ) on the surface of the clinker grains. This layer shields the surface of the cement particles, hindering the diffusion of water and ions to the unreacted core, and thereby significantly slows down further hydration processes. The higher the concentration of gypsum, the more continuous and denser the ettringite barrier formed, which leads to a more significant delay in setting.

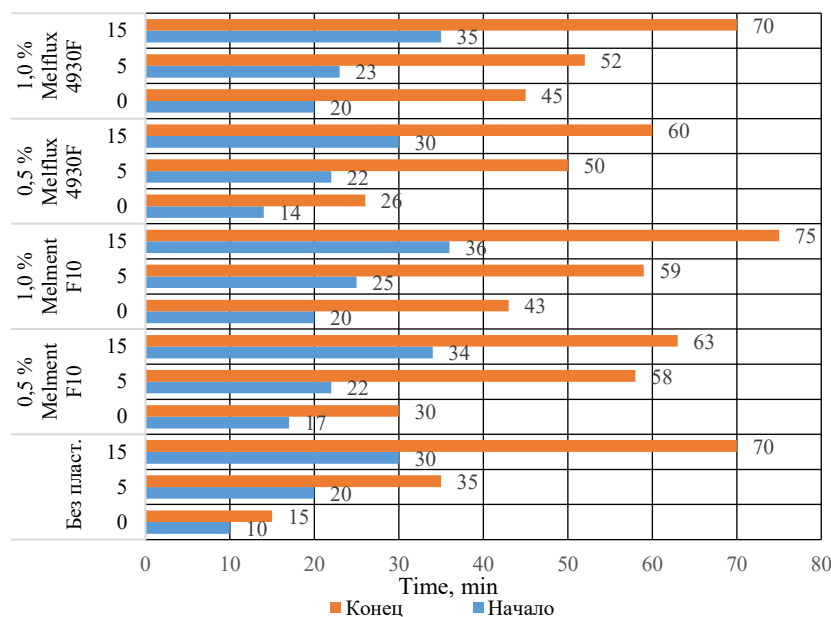
The introduction of plasticizer additives into mixtures based on calcium sulfoaluminate cement without gypsum also leads to a prolongation of the cement setting times: the initial setting time increases from 10 min to 17-20 min for Melment F10 and to 14-20 min for Melflux 4930F.

РИСУНОК 3

**ВЛИЯНИЕ ДВУВОДНОГО ГИПСА И ПЛАСТИФИКАТОРОВ НА СРОКИ СХВАТЫВАНИЯ ЦЕМЕНТОВ**

Figure 3

**Influence of dihydrate gypsum and plasticizers on the setting times of cements**



Данное явление можно объяснить тем, что молекулы пластификатора, адсорбируясь на частицах вяжущего, отталкивают молекулы воды и тем самым несколько тормозят его скорость гидратации.

При введении пластификаторов в состав растворов на основе сульфоалюминатного цемента с добавками двуводного гипса время начало схватывания цементов еще более увеличивается (на 2–6 мин в сравнении с безгипсовым вяжущим), а время конца схватывания не изменяется или немного увеличивается.

This phenomenon can be explained by the fact that the plasticizer molecules, adsorbing on the binder particles, repel water molecules and thereby somewhat slow down its hydration rate.

When plasticizers are introduced into the composition of mixtures based on calcium sulfoaluminate cement with dihydrate gypsum additives, the initial setting time of the cements increases even more (by 2-6 min compared to the gypsum-free binder), and the final setting time does not change or increases slightly.

В данном случае увеличение сроков схватывания вяжущего можно объяснить двойным действием малопроницаемой оболочки кристаллов этtringита и отталкиванием молекул воды адсорбированным пластификатором, приводящим к замедлению процессов гидратации цемента.

### Выводы

Проведенное исследование позволило установить комплексное влияние двуводного гипса и пластифицирующих добавок на свойства сульфоалюминатного цемента и выявить следующие закономерности:

1. В отсутствие пластификаторов добавка гипса снижает нормальную густоту сульфоалюминатного цемента; снижение нормальной густоты увеличивается с ростом концентрации добавки гипса.
2. Добавки пластификаторов резко снижают нормальную густоту цементов; более высокую эффективность имеет поликарбоксилатный пластификатор Melflux 4930F;
3. С ростом концентрации добавки гипса эффективность действия пластификаторов уменьшается;
4. Добавки гипса и пластификаторов, как введенные в состав цемента отдельно, так и совместно, удлиняют сроки начала и конца схватывания цемента;
5. Более сильное замедляющее действие на сроки схватывания сульфоалюминатного цемента оказывают добавки двуводного гипса.

### Литература:

1. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. Москва: Стройиздат, 1986. 208 с.
2. Krivoborodov, Y. Synthesis of high alumina cement based on metallurgy wastes / Y. Krivoborodov, S. Samchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety - 2. Building Materials and Products, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 2. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 022034. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/2/022034> . – EDN JEPJSS.
3. Samchenko, S. V. Usage aluminiferous waste in the production of aluminate cements / S. V. Samchenko, Y. R. Krivoborodov, I. Y. Burlov // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 июня – 05 2017 года. Vol. 17. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2017. – P. 465-472. – <https://doi.org/10.5593/sgem2017/62/S26.059> . – EDN XZUNFU.
4. Кузнецова, Т. В. Химия, состав и свойства специальных цементов / Т. В. Кузнецова, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий : материалы научно-практической конференции, Томск, 03–04 октября 2000 года / Томский политехнический университет (ТПУ). Том 1. – Томск: Национальный исследовательский

In this case, the increase in the setting times of the binder can be explained by the dual action of the low-permeability shell of ettringite crystals and the repulsion of water molecules by the adsorbed plasticizer, leading to a slowdown in the cement hydration processes.

### Conclusions

The conducted research allowed us to establish the complex influence of dihydrate gypsum and plasticizing additives on the properties of calcium sulfoaluminate cement and identify the following patterns:

1. In the absence of plasticizers, the addition of gypsum reduces the standard consistency of calcium sulfoaluminate cement; the reduction in standard consistency increases with increasing concentration of the gypsum additive.
2. Additives of plasticizers sharply reduce the standard consistency of cements; the polycarboxylate plasticizer Melflux 4930F has higher efficiency;
3. With an increase in the concentration of the gypsum additive, the effectiveness of the plasticizers decreases;
4. Additives of gypsum and plasticizers, both introduced into the cement composition separately and jointly, prolong the initial and final setting times of the cement;
5. Additives of dihydrate gypsum have a stronger retarding effect on the setting times of calcium sulfoaluminate cement.

### References

1. Kuznetsova, T.V. Aluminate and sulfoaluminate cements / T.V. Kuznetsova. – Moscow: Stroyizdat, 1986. – 208 p. – EDN YRNAYL.
2. Krivoborodov, Y. Synthesis of high alumina cement based on metallurgy wastes / Y. Krivoborodov, S. Samchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety - 2. Building Materials and Products, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 2. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 022034. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/2/022034> . – EDN JEPJSS.
3. Samchenko, S. V. Usage aluminiferous waste in the production of aluminate cements / S. V. Samchenko, Y. R. Krivoborodov, I. Y. Burlov // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 июня – 05 2017 года. Vol. 17. – Albena, Bulgaria: Limited Liability Company STEF92 Technology, 2017. – P. 465-472. – <https://doi.org/10.5593/sgem2017/62/S26.059> . – EDN XZUNFU.
4. Kuznetsova, T. V. Chemistry, composition and properties of special cements / T. V. Kuznetsova, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko // Chemistry and chemical technology at the turn of the millennium: materials of the scientific and practical conference, Tomsk, October 3–4, 2000 / Tomsk Polytechnic University (TPU). Vol. 1. – Tomsk: National

- Томский политехнический университет, 2000. – С. 96-98. – EDN TOEXOZ.
5. Sulfoaluminate cements based on technogenic waste / S. Samchenko, Yu. Krivoborodov, I. Burlov, S. Krivoborodova // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018: Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 02–08 июля 2018 года. Vol. 18. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2018. – P. 341-348. – <https://doi.org/10.5593/sgem2018/6.3/S26.045> . – EDN BISKUJ.
6. Кривобородов Ю.Р., Бурлов И.Ю. Свойства расширяющегося цемента в зависимости от параметров производств // Сухие строительные смеси, 2015. №2. С. 39-41.
7. Кривобородов, Ю.Р. Физико-химические свойства сульфатированных клинкеров: Аналитический обзор / Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: ВНИИЭСМ, 1991. – 55 с. – (Цементная промышленность; Выпуск 2). – EDN TSRXOD.
8. Захаров С.А. Оптимизация составов бетонов высокоэффективными поликарбоксилатными пластификаторами // Строительные материалы, 2008, № 3, С. 42-43.
9. Ружицкая А.В., Потапова Е.Н., Влияние добавок-пластификаторов на свойства белого портландцемента // Международный научный журнал «Инновационная наука», 2009, С. 14-23
10. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.
11. Самченко, С. В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов / С. В. Самченко ; Федер. агентство по образованию, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Издат. центр. – Москва: Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева, 2005. – 154 с. – ISBN 5-7237-0514-0. – EDN QNDVZV.
12. Самченко, С. В. Влияние суперпластификатора на морфологию кристаллов этtringита / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. – 2015. – Т. 22, № 2. – С. 17-21. – EDN UACCCX.
13. Самченко, С. В. Образование и рост кристаллов этtringита в присутствии полимерных функциональных добавок / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 5, № 12. – С. 118-122. – EDN XHEBOF.
14. Самченко, С.В. Влияние пластификатора на процессы перекристаллизации при твердении алюмината кальция / С.В. Самченко, С.Ю. Кривобородова // Техника и технология силикатов. – 2017. – Т. 24, № 3. – С. 25-30. – EDN ZERBLL.
15. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
16. Анализ структурно-фазового состояния моноалюмината кальция / Ю. А. Абзаев, Ю. С. Саркисов, Т. В. Кузнецова [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 3(47). – С. 56-62. – <https://doi.org/10.5862/MCE.47.6> . – EDN SBZAHX.
- Research Tomsk Polytechnic University, 2000. – P. 96–98. – EDN TOEXOZ.
5. Sulfoaluminate cements based on technogenic waste / S. Samchenko, Yu. Krivoborodov, I. Burlov, S. Krivoborodova // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018: Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 02–08 июля 2018 года. Vol. 18. – Albena, Bulgaria: Limited Liability Company STEF92 Technology, 2018. – P. 341-348. – <https://doi.org/10.5593/sgem2018/6.3/S26.045> . – EDN BISKUJ.
6. Krivoborodov Yu.R., Burlov I.Yu. Properties of expanding cement depending on production parameters // Sukhiye stroitel'nyye smesi, 2015. No. 2. P. 39-41.
7. Krivoborodov, Yu. R. Physicochemical Properties of Sulfated Clinkers: Analytical Review / Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. - Moscow: VNIIESM, 1991. - 55 p. - (Cement Industry; Issue 2). - EDN TSRXOD.
8. Zakharov S.A. Optimization of concrete compositions with highly effective polycarboxylate plasticizers // Stroitel'nyye materialy, 2008, No. 3, pp. 42-43.
9. Ruzhitskaya A.V., Potapova E.N., The influence of plasticizer additives on the properties of white Portland cement // International scientific journal "Innovatsionnaya nauka", 2009, pp. 14-23
10. Samchenko, S. V. Formation and genesis of the structure of cement stone / S. V. Samchenko. - 2nd edition. - Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2020. - 288 p. - ISBN 978-5-7264-2808-6. - EDN KCBIBU.
11. Samchenko, S. V. The role of ettringite in the formation and genesis of the structure of special cements stone / S. V. Samchenko; Samchenko S. V.; Federal Education Agency, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Publishing Center. – Moscow: D. I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, 2005. – 154 p. – ISBN 5-7237-0514-0. – EDN QNDVZV.
12. Samchenko, S. V. Influence of superplasticizer on the morphology of ettringite crystals / S. V. Samchenko, E. M. Makarov // Engineering and technology of silicates. - 2015. - Vol. 22, No. 2. - P. 17-21. - EDN UACCCX.
13. Samchenko, S. V. Formation and growth of ettringite crystals in the presence of polymer functional additives / S. V. Samchenko, E. M. Makarov // Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya. - 2016. - Vol. 5, No. 12. - P. 118-122. - EDN XHEBOF.
14. Samchenko, S.V. Influence of plasticizer on recrystallization processes during hardening of calcium aluminate / S.V. Samchenko, S.Yu. Krivoborodova // Engineering and technology of silicates. - 2017. - Vol. 24, No. 3. - P. 25-30. - EDN ZERBLL.
15. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
16. Analysis of the structural and phase state of calcium monoaluminate / Yu. A. Abzaev, Yu. S. Sarkisov, T. V. Kuznetsova [et al.] // Journal of Civil Engineering. - 2014. - No. 3 (47). - P. 56-62. - <https://doi.org/10.5862/MCE.47.6> . - EDN SBZAHX.
17. Samchenko, S. V. Features of the formation of crystalline hydrosulfoaluminates during hydration of stoichiometric mixtures of calcium aluminates with calcium sulfate / S. V.

17. Samchenko, S. V. Features of the formation of crystalline hydrosulfoaluminates during hydration of stoichiometric mixtures of calcium aluminates with calcium sulfate / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 393. – P. 132102. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132102> . – EDN CRATKC.

Samchenko, A. V. Korshunov // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 393. – P. 132102. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132102> – EDN CRATKC.

---

**Тхет Наинг Мьинт**, к.т.н., докторант кафедры химической технологии композиционных и вяжущих материалов, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева.

*E-mail:* [phaymyint.mgwe@gmail.com](mailto:phaymyint.mgwe@gmail.com)

**Хтет Паинг Аунг**, аспирант кафедры химической технологии композиционных и вяжущих материалов, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева.

*E-mail:* [htetpaingaug70792@gmail.com](mailto:htetpaingaug70792@gmail.com)

**Кривобородов Юрий Романович**, д.т.н., профессор, кафедры химической технологии композиционных и вяжущих материалов, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева; профессор кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

*E-mail:* [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Thet Naing Myint**, Candidate of Sciences (Engineering), doctoral student, Department of Chemical Technology of Composite and Binding Materials, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow.

*E-mail:* [phaymyint.mgwe@gmail.com](mailto:phaymyint.mgwe@gmail.com)

**Htet Paing Aung**, postgraduate student, Department of Chemical Technology of Composite and Binding Materials, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Moscow.

*E-mail:* [htetpaingaug70792@gmail.com](mailto:htetpaingaug70792@gmail.com)

**Krivoborodov Yuri Romanovich**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Chemical Technology of Composite and Binding Materials, Mendeleev Russian State Technical University; Professor of the Department of Construction Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow.

*E-mail:* [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru).

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.00

EDN qsyqqn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-456-465

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЩЕЛОЧНО-КРЕМНЕЗЕМНОЙ КОРРОЗИИ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Бахарев М.В.<sup>1</sup>, Кондращенко В.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ))

### АННОТАЦИЯ

В работе предложена методика оценки прочностных характеристик предварительно напряженных железобетонных конструкций, подверженных деградации вследствие щелочно-кремнеземной коррозии. Методология базируется на принципах информационного моделирования, что позволяет интегрировать данные о процессе деградации в целостную цифровую модель объекта. Основу методики составляет макромодель, устанавливающая прямую корреляцию между процессами набухания реактивного крупного заполнителя и результирующим напряженно-деформированным состоянием конструктивной системы.

Ключевым инструментом модели являются введенные коэффициенты модификации для прочностных характеристик и модуля упругости бетона. Данные коэффициенты позволяют анизотропно редуцировать механические свойства материала в зависимости от величины деформаций набухания, учитывая разнонаправленный характер повреждений. В рамках исследования оценена корреляция между снижением значений коэффициентов модификации и характером внешнего силового воздействия (долговременное сжатие или растяжение). На основе полученных зависимостей сформулированы практические рекомендации по структурированию и параметризации информационной модели, направленные на повышение адекватности оценки несущей способности и долговечности поврежденных конструкций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** щелочно-кремнеземная коррозия, макромоделирование, анизотропная деградация, бетон, напряженно-деформированное состояние

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бахарев М.В.1, Кондращенко В.И. Моделирование щелочно-кремнеземной коррозии преднапряженных железобетонных конструкций // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 456-465. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-456-465>, EDN qsyqqn.

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN qsyqqn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-456-465

## MODELING OF ALKALI-SILICA CORROSION OF PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES

Bakharev M.V.<sup>1</sup>, Kondrashchenko V.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Russian University of Transport (RUT(MIIT))

### ABSTRACT

This paper proposes a method for assessing the strength characteristics of prestressed reinforced concrete structures. The structures were subject to degradation due to alkali-silica corrosion. The methodology is based on the principles of information modeling. This allows for the integration of degradation process data into a comprehensive digital model of the facility. The methodology is based on a macromodel. It establishes a direct correlation between the swelling processes of reactive coarse aggregate and the resulting stress-strain state of the structural system.

The key tool of the model is the modification coefficients introduced for the strength characteristics and elastic modulus of concrete. These coefficients allow for anisotropic reduction of the material's mechanical properties depending on the magnitude of swelling deformations. In this case, the multidirectional nature of the damage is taken into account. This study assessed the correlation between the reduction in modification coefficient values and the nature of the external force applied. The external force applied was either long-term compression or tension. Based on the obtained dependencies, practical recommendations for structuring and parameterizing the information model were formulated. The recommendations are aimed at improving the adequacy of assessing the load-bearing capacity and durability of damaged structures.

**KEY WORDS:** alkali-silica corrosion, macromodeling, anisotropic degradation, concrete, stress-strain state.

**FOR CITATION:** Bakharev M.V., Kondrashchenko V.I. Modeling of alkali-silica corrosion of prestressed concrete structures// Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 4568 – 465. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-456-465>, EDN qsyqqn.

## ВВЕДЕНИЕ

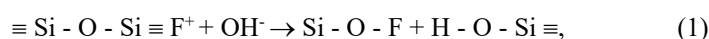
На бетонные и железобетонные конструкции и сооружения, такие как шпалы, дамбы, мосты и др. значительное влияние оказывает внешняя агрессивная среда. В частности, деструктивный эффект могут вызывать щелочи порового раствора в бетоне при взаимодействии с химически активным кремнеземом заполнителя и образованием в последующем силикатного геля. Данный тип химической коррозии называется щелочно-кремнеземная коррозия (ЩКК), по которой уже выполнено большое количество теоретических и экспериментальных исследований. Проблема состоит в том, что химические и физические процессы, лежащие в основе ЩКК довольно сложны, зависят от большого числа разнообразных факторов, механизм которых для каждого случая до сих пор еще полностью не раскрыт [1-4].

Возникновение в зоне контакта реакционноспособного заполнителя с цементной матрицей напряженного-деформированного состояния (НДС) связано с образованием увеличенного объема новообразований при диффузии молекул воды внутрь силикатного геля. В результате возникновения избыточного давления бетон растрескивается и теряет свои прочностные и эксплуатационные свойства.

Так как, изучение большого количества параметров в натурном эксперименте трудно реализуемо и даже достоверно невозможно, предлагается выполнить изучение состояния преднапряженных железобетонных конструкций при ЩКК с помощью информационной модели. За ее основу взята математическая макромодель, связывающая процесс набухания силикатного геля и НДС конструкции [5].

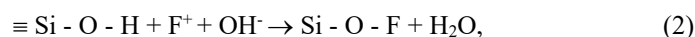
### Щелочно-силикатная реакция

Процесс ЩКК является многоступенчатым и проходит в несколько этапов. Вначале поверхностный слой кремнезема  $\text{SiO}_2$  сорбирует анионы  $\text{OH}^-$ . Этот контакт на первом этапе приводит к активной реакции, в результате которой происходит деполимеризация молекул кремния с образованием слабой кремневой кислоты:

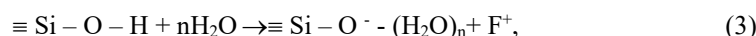


где F – катион щелочного металла, в роли которого зачастую выступает натрий Na.

В дальнейшем кислота продолжает взаимодействовать с другими гидроксильными ионами:



Образовавшийся кремневый силикат (1,2) проявляет аморфные признаки и свойства гигроскопичности. На втором этапе происходит поглощение силикатом свободной воды в растворе и деструктивное расширение щелочно-силикатного геля (рис.1):



где n – число гидратации.

Для протекания ЩКК необходимо выполнение трех обязательных условий: наличие химически активного кремнезема в заполнителе, высокий уровень щелочности порового раствора, а также высокая влажность. Без соблюдения какого-либо из этих факторов ЩКК-реакция не протекает.

## INTRODUCTION

The external aggressive environment has a significant impact on concrete and reinforced concrete structures and buildings, such as sleepers, dams, bridges, etc. In particular, the destructive effect can be caused by alkalis in the pore solution in concrete when interacting with chemically active silica filler and subsequently forming a silicate gel. This type of chemical corrosion is called alkali-silica corrosion (ASC). A large number of theoretical and experimental studies have been carried out in this area. The chemical and physical processes underlying the ASC are quite complex and depend on a large number of different factors. The mechanism of alkali-silica corrosion for each case has not yet been fully elucidated [1-4].

The occurrence of a stress-strain state (SSS) in the contact zone of the reactive filler with the cement matrix is associated with the formation of an increased volume of new formations during the diffusion of water molecules into the silicate gel. As a result of excess pressure, concrete cracks and loses its strength and performance properties.

It is proposed to study the state of prestressed reinforced concrete structures during alkali-silica corrosion using an information model. This is due to the fact that studying a large number of parameters in a natural experiment is difficult to implement and even reliably impossible. The information model is based on a mathematical macromodel that links the process of swelling of silicate gel and the stress-strain state of the structure [5].

### Alkali-silicate reaction

The process of ASC is multi-stage and takes place in several stages. Initially, the surface layer of silica  $\text{SiO}_2$  absorbs  $\text{OH}^-$  anions. This initial contact leads to an active reaction, resulting in the depolymerization of silicon molecules, forming weak silicic acid:

where F is an alkali metal cation, often sodium Na.

The acid then continues to interact with other hydroxyl ions:

The resulting siliceous silicate (1,2) exhibits amorphous characteristics and hygroscopic properties. In the second stage, the silicate absorbs free water in the solution and destructively expands the alkali-silicate gel (Fig. 1):

where n is the hydration number.

For alkali-silica corrosion to occur, three essential conditions must be met: the presence of reactive silica in the aggregate, a high alkalinity level in the pore solution, and high humidity. Without any of these conditions, the alkali-silicate reaction does not occur.

РИСУНОК 1

УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ЩЕЛОЧНО-КРЕМНЕЗЕМНОЙ КОРРОЗИИ [6]

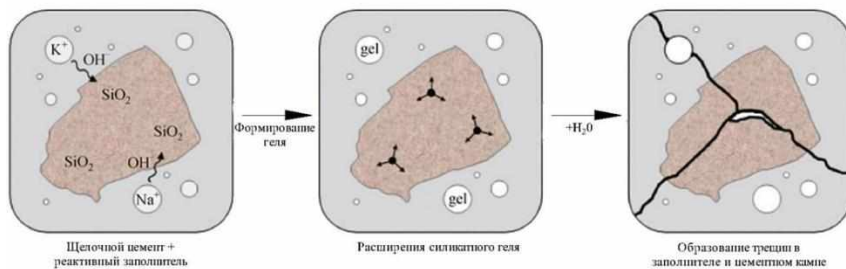


Figure 1

A simplified diagram of the alkali-silica corrosion process [6]

Основным фактором деструкции цементного камня являются внутренние напряжения, вызывающие трещинообразование и последующее развитие сети трещин под воздействием расширяющегося геля. Впервые Хансен [7] предложил теорию осмотического давления, которая предполагает, что продукты ЩКК реакционноспособного заполнителя ведут себя как полупроницаемая мембрана, через которую, в отличие от малых по размеру молекул воды, не могут диффундировать в окружающую среду молекулы полимера.

**Кинетика набухания геля**

В соответствии с исследованиями Танаки [8], полупроницаемая мембрана является подвижной и определяет границу образованного геля. При проникновении воды, гель набухает. Однако, согласно теории Флори-Хаггинса, при достаточном давлении внешней среды НДС на поверхности мембраны ( $\sigma_{sur}$ ) уравнивается:

$$\sigma_{sur} = \sigma_{ext} - \sigma_{osm}, \tag{4}$$

где  $\sigma_{ext}$  – напряжение, создаваемое внешней средой;  $\sigma_{osm}$  – то же, создаваемое осмотическим воздействием расширяющегося геля.

Для определения величины осмотического давления получена математическая модель в уравнениях, описывающая упругие напряжения в полимерном геле в зоне контакта с цементной матрицей [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{osm} &= E \cdot \left[ \frac{V_1(t)}{V_0(t)} - 1 \right]^{\frac{1}{3}}; \\ V_n(t) &= \frac{4\pi}{3} \cdot [(R_0 + s)^3 - R_0^3]; \\ V_0(t) &= \frac{4\pi}{3} \cdot [R_0^3 - R_1^3], \end{aligned} \tag{5}$$

где,  $V_1$  – объем геля в набухом состоянии;  $V_0$  – то же, в исходном состоянии;  $R_0$  – радиус заполнителя в исходном состоянии;  $R_1$  – подвижная граница геля в набухом состоянии;  $s$  – упругая деформация сферы при набухании в бетоне;  $E$  – объемный модуль деформации.

Подстановкой  $V_0$  и  $V_1$  в (5) находим формулу для определения осмотического давления:

$$\sigma_{osm} = E \cdot \left[ \frac{(R_0 + s)^3 - R_0^3}{R_0^3 - R_1^3} - 1 \right]^{\frac{1}{3}}, \tag{6}$$

Образование трещин происходит если суммарное напряжение в поверхностном слое силикатного геля

The main factor in the destruction of cement stone is internal stress, which causes crack formation and subsequent development of a network of cracks under the influence of the expanding gel. Hansen [7] was the first to propose a theory of osmotic pressure, which assumes that the ASC products of a reactive filler behave as a semi-impermeable membrane through which, unlike small water molecules, polymer molecules cannot diffuse into the surrounding environment.

**Kinetics of gel swelling**

According to Tanaka's research [8], the semipermeable membrane is mobile and defines the boundary of the formed gel. When water penetrates through it, the gel swells. However, according to the Flory-Huggins theory, under sufficient pressure of the external environment, the stress-strain state on the membrane surface ( $\sigma_{sur}$ ) is balanced:

where  $\sigma_{ext}$  is the stress created by the external environment;  $\sigma_{osm}$  is the same, created by the osmotic effect of the expanding gel.

To determine the value of osmotic pressure, a mathematical model in equations was obtained that describes the elastic stresses in the polymer gel in the contact zone with the cement matrix [3]:

where  $V_1$  is the volume of the gel in the swollen state;  $V_0$  is the same, in the initial state;  $R_0$  is the radius of the filler in the initial state;  $R_1$  is the mobile boundary of the gel in the swollen state;  $s$  is the elastic deformation of the sphere during swelling in concrete;  $E$  is the bulk modulus.

By substituting  $V_0$  and  $V_1$  into (5) we find the formula for determining the osmotic pressure:

Cracks form if the total stress in the surface layer of silicate gel exceeds or is equal to the tensile strength of concrete:

превышает или равен прочности бетона на растяжение:  $\sigma_{sur} \geq R_{bt}$ . Следовательно, в сжатых зонах, особенно на начальных этапах, процесс растрескивания бетона под действием осмотических сил может купироваться. В растянутой же зоне железобетонной конструкции скорость образования и развития трещин, вызванных ЩКК-реакцией, наоборот усиливается до момента полного превращения кремнеземного полимера в силикат натрия [9]. Ввиду сложности и много стадийности протекания процессов ЩКК для всестороннего исследования поведения железобетонных конструкций при различном НДС необходимо построение информационной модели.

### Формирование модели

В рассматриваемой модели анизотропия прочностных свойств бетона определяется потенциалом реакционной способности заполнителя и НДС конструкции. Применяются поправочные коэффициенты модификации для каждого направления для прочности бетона на сжатие  $k_{bi}$ , прочность на растяжение  $k_{bti}$  и модуль упругости  $k_{Ei}$ . Коэффициенты модификации определяются на основе прочностных свойств бетона без повреждений от ЩКК. Для существующих конструкций эти значения могут быть определены на основе испытаний материала кернов, извлеченных из неповрежденной части сооружения. Если это невозможно, оценка производится на основе лабораторных испытаний образца бетона, выдержанного в течение 28 суток или с учетом возраста конструкции.

Эксперименты Ферчи и Веккио [10] позволили создать базу данных по свойствам бетона, поврежденного щелочно-кремнеземной реакцией (ЩКК). В научных работах чаще всего описываются испытания стандартных бетонных образцов, которые не подвергались нагрузке во время реакции. В таких образцах трещины от ЩКК располагаются беспорядочно, создавая так называемую хаотическую «карту трещин».

Результаты были сгруппированы [10] по трем критериям:

- условиям нагружения образца во время реакции,
- величине деформации расширения от ЩКК
- направлению измерения прочности относительно приложенной ранее нагрузки.

Важно, что в рассмотренном исследовании реакционный бетон сравнивался с контрольными образцами, изготовленными из инертного заполнителя.

Коэффициенты модификации ( $k_{bi}$ ,  $k_{bti}$ ,  $k_{Ei}$ ), определяющие изменение прочностных и деформационных характеристик бетона, были вычислены [6] по уравнениям (6 - 8). Их суть – в нормированном отношении механических свойств реакционного бетона к свойствам неактивного (контрольного) образца, с поправкой на начальное расхождение этих свойств в возрасте 28 суток ( $R_{bi28}$ ,  $R_{bti28}$  и  $E_{i28}$ ). Благодаря коэффициентам модификации, зная первичную степень повреждения контрольных образцов, возможно спрогнозировать дальнейшее ухудшения свойств бетона под действием коррозии. Сами коэффициенты модификации определяются следующим образом:

$$k_{bi} = \frac{R_{bir}/R_{biN}}{R_{bi28r}/R_{bi28N}}; \quad (7)$$

$$k_{bti} = \frac{R_{btir}/R_{btiN}}{R_{bti28r}/R_{bti28N}}; \quad (8)$$

$\sigma_{sur} \geq R_{bt}$ . Consequently, in compressed zones, especially in the initial stages, the process of concrete cracking under the influence of osmotic forces can be stopped. In the stretched zone of a reinforced concrete structure, the rate of formation and development of cracks caused by the Alkali-silicate reaction, on the contrary, increases until the moment of complete transformation of the silica polymer into sodium silicate [9]. Due to the complexity and multi-stage nature of the alkali-silica corrosion processes, it is necessary to construct an information model for a comprehensive study of the behavior of reinforced concrete structures under various stress-strain states.

### Formation of the model

In the model under consideration, the anisotropy of the strength properties of concrete is determined by the reactivity potential of the filler and the stress-strain state of the structure. Modification correction factors are applied for each direction for the concrete compressive strength  $k_{bi}$ , tensile strength  $k_{bti}$  and modulus of elasticity  $k_{Ei}$ . Modification coefficients are determined based on the strength properties of concrete without damage from the alkali-silica corrosion concrete. For existing structures, these values can be determined based on testing of core material extracted from the undamaged portion of the structure. If this is not possible, the assessment is made on the basis of laboratory tests of a concrete sample aged for 28 days or taking into account the age of the structure.

The experiments of Ferche and Vecchio [10] made it possible to create a database on the properties of concrete damaged by alkali-silica reaction (ASC). Scientific papers most often describe tests of standard concrete specimens that were not subjected to stress during the reaction. In such specimens, cracks from the ASC are randomly distributed, creating a so-called chaotic "crack map."

The results were grouped [10] according to three criteria:

- loading conditions of the specimen during the reaction,
- the magnitude of the expansion deformation from the ASC,
- the direction of strength measurement relative to the previously applied load.

It is important that in the study under consideration, reactive concrete was compared with control samples made from inert aggregate.

The modification coefficients ( $k_{bi}$ ,  $k_{bti}$ ,  $k_{Ei}$ ), which determine the change in the strength and deformation characteristics of concrete, were calculated [6] using equations (6 - 8). Their essence lies in the normalized ratio of the mechanical properties of reactive concrete to the properties of a non-reactive (control) sample, with an adjustment for the initial divergence of these properties at the age of 28 days ( $R_{bi28}$ ,  $R_{bti28}$  and  $E_{i28}$ ). Thanks to modification coefficients, knowing the initial degree of damage of control samples, it is possible to predict further deterioration of concrete properties under the influence of corrosion. The modification coefficients are determined as follows:

$$k_{Ei} = \frac{E_{ir}/E_{iN}}{E_{i28r}/E_{i28N}}, \quad (9)$$

где индекс  $i$  представляет основное направление ( $i = x, y, z$ ),

$N$  – относится к нереакционному бетону,

$r$  – реакционноспособный бетон.

Бетонные конструкции, как правило, испытывают длительные нагрузки (в частности, преднапряжение). В настоящем исследовании анализируется изменение свойств бетона в зависимости от типа напряженного состояния.

Для направлений, свободных от сжатия, поправочные коэффициенты ( $k_{bi,free}$ ,  $k_{bti,free}$ ,  $k_{Ei,free}$ ), приведенные в уравнениях (10)-(11), заданы как функции параметра линейного расширения, вызванного ЩКК. Данные функциональные зависимости были получены [6] на основе экспериментальных значений, опубликованных Ферчи и Веккио [10]. Для долговременного напряженного состояния при одноосном растяжении использовался подход, аналогичный случаю свободной деформации.

$$k_{bi,free} = \begin{cases} 1,00 - 205,5 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 1,8 \cdot 10^{-3}; \\ 0,63 - 1,75 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 1,8 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 13,2 \cdot 10^{-3}; \\ 0,75 - 10,9 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 13,2 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 27,0 \cdot 10^{-3}; \\ 0,45 & \varepsilon_{\text{ЩКК}} > 27,0 \cdot 10^{-3}. \end{cases} \quad (10)$$

$$k_{bti,free} = \begin{cases} 1,00 - 475,9 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 0,6 \cdot 10^{-3} \\ 0,77 - 86,8 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 0,6 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 2,5 \cdot 10^{-3} \\ 0,70 - 60,0 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 2,5 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 5,0 \cdot 10^{-3} \\ 0,40 & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \geq 5,0 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (11)$$

$$k_{Ei,free} = \begin{cases} 1,00 - 344,4 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 1,8 \cdot 10^{-3} \\ 0,42 - 21,9 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 1,8 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 13,2 \cdot 10^{-3} \\ 0,19 - 4,35 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 13,2 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 27,0 \cdot 10^{-3} \\ 0,07 & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \geq 27,0 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (12)$$

В случае наличия сжимающих напряжений в конструкции, при определении снижения механических свойств бетона необходимо учитывать как коэффициент модификации свободных деформаций ( $k_{bi,free}$ ,  $k_{bti,free}$ ,  $k_{Ei,free}$ ), так и элементарную деформацию ( $e_{bi}$ ) в направлении сжимающих усилий. Она позволяет скорректировать значение разупрочнения бетона с учетом обжатого состояния конструкции.

Для расчета элементарной относительной деформации  $e_i$  используется символ  $e$ , а не общепринятый  $\varepsilon$ . Это сделано для того, чтобы подчеркнуть, что в расчете используется модуль упругости неповрежденного бетона, что соответствует линейной упругой модели.

Элементарная относительная деформация для сжатых направлений рассчитывается как:

$$e_{bi} = R_{bi}/E, \quad (13)$$

где  $R_b$  – долговременное напряжение при сжатии в главном направлении  $i$  ( $i = x, y, z$ );

$E$  – модуль упругости бетона при текущем возрасте конструкции.

where the index  $i$  represents the principal direction ( $i = x, y, z$ ),

$N$  refers to non-reactive concrete,

$r$  refers to reactive concrete.

Concrete structures are typically subjected to long-term loads (particularly prestressing). This study analyzes how concrete properties change depending on the type of stress state.

For directions free from compression, the correction factors ( $k_{bi,free}$ ,  $k_{bti,free}$ ,  $k_{Ei,free}$ ) given in equations (10)-(11) are given as functions of the linear expansion parameter caused by the ASC. These functional dependencies were obtained [6] based on experimental values published by Ferche and Vecchio [10]. For the long-term stress state under uniaxial tension, an approach similar to the free deformation case was used.

In the case of the presence of compressive stresses in the structure, when determining the reduction in the mechanical properties of concrete, it is necessary to take into account both the free deformation modification coefficient ( $k_{bi,free}$ ,  $k_{bti,free}$ ,  $k_{Ei,free}$ ) and the elementary deformation ( $e_{bi}$ ) in the direction of compressive forces. It allows you to adjust the value of concrete softening taking into account the compressed state of the structure.

To calculate the elementary relative strain  $e_i$ , the symbol  $e$  is used, rather than the commonly used  $\varepsilon$ . This is done to emphasize that the calculation uses the elastic modulus of intact concrete, which corresponds to the linear elastic model.

The elementary relative deformation for compressed directions is calculated as:

where  $R_b$  is the long-term compressive stress in the principal direction  $i$  ( $i = x, y, z$ );

$E$  is the modulus of elasticity of concrete at the current age of the structure.

Также, следует учесть, что при напряжениях до 0,3 МПа коэффициенты модификации ( $k_i$ ) остаются постоянными, как и в случае без нагрузки. При превышении этого порога коэффициенты начинают расти, что демонстрирует положительную роль сжатия в замедлении разрушения от ЩКК. Этот эффект учтен через элементарную деформацию при заданном напряжении сжатия в 0,3 МПа. Наибольшее влияние напряжение оказывает на прочность при растяжении, затем на модуль упругости, и в меньшей степени – на прочность при сжатии.

Для сжатого бетона снижение его механических характеристик описывается функцией  $k_i(R_b)$ , приведенной в уравнении (13) [6]:

$$k_i = k_{i,free} + \frac{1}{1,05 \cdot \left(-\frac{\varepsilon_{ЩКК}}{e_i(R_b)}\right)^{0,09}} - \frac{1}{1,05 \cdot \left(-\frac{\varepsilon_{ЩКК}}{e_i(0)}\right)^{0,09}}, \quad (14)$$

где:  $i = x, y, z$  – главные направления (сжатие принимается отрицательным);

$R_{bi}$  – напряжение сжатия в направлении  $i$ ;

$k_{i,free}$  – коэффициент модификации для свободного расширения, рассчитанный по уравнениям (10-12);

$\varepsilon_{ЩКК}$  – величина относительной деформации при воздействии ЩКК;

$e_{bi}$  – элементарная деформация в направлении  $i$ , соответствующая напряжению сжатия  $R_{bi}$ ;

$e_{bi}(0)$  – элементарная относительная деформация в направлении  $i$ , соответствующая пороговому напряжению сжатия 0,3 МПа.

На рис. 2 показана зависимость коэффициентов  $k$  от уровня сжимающего напряжения  $R$  для двух величин расширения ( $0,5 \cdot 10^{-3}$  и  $2,0 \cdot 10^{-3}$ ).

## РИСУНОК 2

График зависимости коэффициентов модификации  $k$  от напряжения сжатия для  $E = 25 \cdot 10^9$  Па [6]

Figure 2

Graph of the dependence of modification coefficients  $k$  on compressive stress for  $E = 25 \cdot 10^9$  Pa [6]

It should also be taken into account that at stresses up to 0.3 MPa, the modification coefficients ( $k_i$ ) remain constant, as in the case without load. When this threshold is exceeded, the coefficients begin to increase, which demonstrates the positive role of compression in slowing down the destruction from alkali-silica corrosion. This effect is taken into account through elementary deformation at a given compressive stress of 0.3 MPa. Stress has the greatest influence on tensile strength, then on elastic modulus, and to a lesser extent on compressive strength.

For compressed concrete, the reduction in its mechanical characteristics is described by the function  $k_i(R_b)$ , given in equation (13) [6]:

where:  $i = x, y, z$  are the principal directions (compression is assumed to be negative);

$R_{bi}$  is the compressive stress in the  $i$ -th direction;

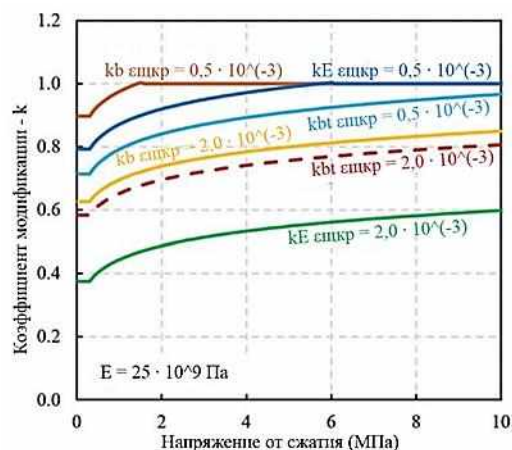
$k_{i,free}$  is the modification coefficient for free expansion, calculated using equations (10-12);

$\varepsilon_{ASC}$  is the relative strain under the action of the SCK;

$e_{bi}$  is the elementary strain in the  $i$ -th direction, corresponding to the compressive stress  $R_{bi}$ ;

$e_{bi}(0)$  is the elementary relative strain in the  $i$ -th direction, corresponding to the threshold compressive stress of 0.3 MPa.

Figure 2 shows the dependence of the coefficients  $k$  on the level of compressive stress  $R$  for two values of expansion ( $0,5 \cdot 10^{-3}$  and  $2,0 \cdot 10^{-3}$ ).



В рамках исследования [6] не учитывалось воздействие постоянных растягивающих напряжений, являющееся критически значимым фактором для динамики поправочных коэффициентов для предварительно напряженных конструкций. Работа [11] демонстрирует, что растягивающая нагрузка интенсифицирует деградацию прочностных и деформационных характеристик (прочности и модуля упругости) бетона, подверженного щелочно-кремнеземной реакции (ЩКР). Следует отметить, что физико-химический механизм данного явления на текущий момент исследован лишь на теоретическом уровне и требует верификации в ходе дальнейших экспериментов. В качестве гипотезы рассматривается синергетический эффект, сочетающий

The study [6] did not take into account the effect of constant tensile stresses, which is a critical factor for the dynamics of correction factors for prestressed structures. The work [11] demonstrates that tensile loading intensifies the degradation of strength and deformation characteristics (strength and modulus of elasticity) of concrete subjected to alkali-silica reaction (ASR). It should be noted that the physicochemical mechanism of this phenomenon has currently been studied only at a theoretical level and requires verification in the course of further experiments. A synergistic effect is considered as a hypothesis, combining a mechanical component—a superposition of external tensile and internal stresses from the expansion of reaction products—and a potential chemical

механическую составляющую — суперпозицию внешних растягивающих и внутренних напряжений от расширения продуктов реакции, — и потенциальную химическую составляющую. Вместе с тем, основываясь на аналогиях с пористыми средами [12-13], допустимо предположение, что развитая сеть микротрещин в цементной матрице может выступать в роли буфера, поглощая продукты реакции и тем самым нивелируя возникновение разрушающего внутреннего напряжения.

В первом приближении предположим, что железобетонная конструкция имеет высокий модуль упругости ( $> 20 \cdot 10^9$  Па) и ширина раскрытия трещин, благодаря армирующим элементам, не превышает нормативных значений. Тогда определяем элементарную деформацию как:

$$e_{bti} = R_{bti}/E, \quad (15)$$

где  $R_{bt}$  — долговременное напряжение при растяжении в главном направлении  $i$  ( $i = x, y, z$ );

$E$  — модуль упругости бетона при текущем возрасте конструкции.

Коэффициент модификации  $k$  для растянутой зоны описывается по аналогии с функцией для сжатия (14), однако пороговое значения растягивающий напряжений, как для сжатия  $R = 0,3$  МПа, не учитывается:

$$k_{it} = k_{i,free} + \frac{1}{1,05 \cdot \left( \frac{\varepsilon_{ЩКК}}{e_{bti}(R_{bti})} \right)^{0,09}}, \quad (16)$$

где:  $i = x, y, z$  — главные направления (сжатие принимается отрицательным);

$R_{bti}$  — постоянное напряжение сжатия в направлении  $i$ ;

$k_{i,free}$  — коэффициент модификации для свободного расширения, рассчитанный по уравнениям (10-12);

$\varepsilon_{ЩКК}$  — величина относительной деформации при ЩКК;

$e_{bti}$  — элементарная относительная деформация в направлении  $i$ , соответствующая напряжению растяжения  $R_{bti}$ .

### Описание модели

Для построения расчетной модели предполагается использование объемных конечных элементов с 4-8 узлами. В качестве базового допущения принимается условие идеального сцепления на границе раздела «бетон–арматура». Однако, в итерационных расчетах необходимо учитывать ослабления контакта между бетоном и армирующими элементами до 30-70 % [14]. Также условностью является применение нормативных значений предела текучести и модуль упругости стали, так как под воздействием сопутствующей ЩКК коррозии [15], полезная площадь сечения может уменьшиться.

Влияние щелочно-кремнеземной коррозии (ЩКК) учитывается введением понижающих коэффициентов к основным прочностным и деформационным характеристикам бетона. Величина этих коэффициентов является функцией от экспериментально полученных деформаций контрольных образцов и вида напряженного состояния. Значения модуля Пуассона принимается нормативным.

В расчете необходимо учитывать три различных случая:

1. Задание бетону физико-механических свойств, соответствующих нормативным показателям СП 63.13330.2018;

component. At the same time, based on analogies with porous media [12-13], it is permissible to assume that a developed network of microcracks in the cement matrix can act as a buffer, absorbing reaction products and thereby leveling the occurrence of destructive internal stress.

As a first approximation, let's assume that the reinforced concrete structure has a high modulus of elasticity ( $> 20 \cdot 10^9$  Pa) and that the crack width, thanks to the reinforcing elements, does not exceed the standard values. Then we define the elementary deformation as:

where  $R_{bt}$  is the long-term tensile stress in the principal direction  $i$  ( $i = x, y, z$ );

$E$  is the modulus of elasticity of concrete at the current age of the structure.

The modification coefficient  $k$  for the stretched zone is described by analogy with the function for compression (14), however, the threshold value of tensile stress, as for compression  $R = 0.3$  MPa, is not taken into account:

where:  $i = x, y, z$  are the principal directions (compression is assumed to be negative);

$R_{bti}$  is the constant compressive stress in the  $i$ -th direction;

$k_{i,free}$  is the modification coefficient for free expansion, calculated using equations (10-12);

$\varepsilon_{ASC}$  is the relative strain during ASC;

$e_{bti}$  is the elementary relative strain in the  $i$ -th direction, corresponding to the tensile stress  $R_{bti}$ .

### Model description

To construct the calculation model, it is assumed that volumetric finite elements with 4-8 nodes will be used. The basic assumption is the condition of ideal adhesion at the concrete-reinforcement interface. However, iterative calculations must take into account weakening of the contact between concrete and reinforcing elements by up to 30-70% [14]. The use of standard values for the yield strength and elastic modulus of steel is also arbitrary. This is due to the fact that, under the influence of concomitant alkali-silica corrosion [15], the effective cross-sectional area may decrease.

The influence of alkali-silica corrosion (ASC) is taken into account by introducing reduction factors to the main strength and deformation characteristics of concrete. The magnitude of these coefficients is a function of the experimentally obtained deformations of the control specimens and the type of stress state. The value of Poisson's modulus is accepted as standard.

Three different cases must be taken into account in the calculation:

1. Assigning physical and mechanical properties to concrete that correspond to the standard indicators of SP 63.13330.2018;

2. Применение в модели экспериментальных значений прочности на растяжение, сжатия и модуля упругости бетона в возрасте 28 суток без воздействия ЩКК;

3. Использование понижающих коэффициентов модификации  $k_i$  для  $R_{bt}$ ,  $R_b$ ,  $E$  с учетом экспериментальных значений относительных деформаций по всем направлениям.

Для количественной оценки влияния деформации, вызванной ЩКК, возможно применять как анизотропную модель, так и изотропную. Чарльзвуд [16] в своей анизотропной модели рассматривает как для расширения, так и свойства материалов независимо для каждого направления, в то же время Саума и Перотти [17] учитывают на модуль упругости давления силикатного геля. Как показало сравнение [6], анизотропное задание параметров модели точнее соответствуют экспериментальным значениям (деформации и прочность в зависимости от направления).

Наибольшее влияние на расчетные характеристики внецентренно-растянутого элемента оказывает: размытое/дискретное задание армирования, прочность сцепления между бетоном и арматурой, коррозия стали, величина и направление деформаций, вызванных ЩСР, корректность граничных условий, геометрическая и физическая нелинейность материалов.

### Выводы

1. Для диагностики и прогнозирования состояния конструкций, подверженных щелочно-кремнеземной коррозии, целесообразно применять подходы информационного моделирования. В основе предлагаемой методики лежит макромодель, устанавливающая прямую связь между процессами набухания (инициированными коррозией поверхности заполнителя) и результирующим напряженно-деформированным состоянием конструкции как целостной системы. Основным инструментом для учета деградации бетона в модели являются коэффициенты модификации  $k_i$  для прочности на сжатие, растяжение и модуля упругости. Эти коэффициенты, полученные на основе обширной экспериментальной базы данных [10], позволяют анизотропно снижать механические характеристики бетона в зависимости от величины деформаций, вызванных ЩКК ( $\epsilon_{ЩКК}$ ), величины и характера длительных эксплуатационных нагрузок (сжатие/растяжение).

2. Ключевым инструментом для описания деградации бетона в модели являются коэффициенты модификации ( $k_i$ ), применяемые к характеристикам прочности при сжатии ( $R_b$ ), растяжении ( $R_{bt}$ ) и модулю упругости ( $E$ ). Указанные коэффициенты, верифицированные на основе обширного массива экспериментальных данных [10], позволяют анизотропно редуцировать механические свойства бетона в зависимости от двух ключевых факторов:

- величины деформаций свободного набухания ( $\epsilon_{ЩКК}$ )
- параметров длительного эксплуатационного нагружения.

3. Результаты анализа демонстрируют существенную зависимость влияния ЩКР от внешнего напряженного состояния. Установлено, что сжимающие напряжения, превышающие пороговое значение в 0,3 МПа, оказывают ингибирующее воздействие на процесс деградации, что выражается в росте коэффициентов модификации  $k_i$  с увеличением уровня сжатия. Напротив, растягивающие напряжения, согласно гипотезе, должны интенсифицировать развитие деформаций ЩКК, однако данный тезис требует дальнейшего эмпирического подтверждения.

2. Application of experimental values of tensile strength, compressive strength and elastic modulus of concrete at the age of 28 days without exposure to ASC in the model;

3. Using the reduction factors of modification  $k_i$  for  $R_{bt}$ ,  $R_b$ ,  $E$  taking into account the experimental values of relative deformations in all directions. To quantitatively assess the influence of deformation caused by alkali-silica corrosion, it is possible to use both anisotropic and isotropic models. Charlowood [16] in his anisotropic model considers both the expansion and the properties of materials independently for each direction, while Saouma and Perotti [17] take into account the modulus of elasticity of the pressure of silicate gel. As the comparison [6] showed, the anisotropic assignment of model parameters more accurately corresponds to the experimental values (deformations and strength depending on the direction).

The greatest influence on the design characteristics of an eccentrically tensioned element is exerted by: the diffuse/discrete assignment of reinforcement, the strength of the bond between concrete and reinforcement, steel corrosion, the magnitude and direction of deformations caused by the alkali-silicate reaction, the correctness of the boundary conditions, and the geometric and physical nonlinearity of materials.

### Conclusions

1. To diagnose and predict the condition of structures subject to alkali-silica corrosion, it is advisable to use information modeling approaches. The proposed method is based on a macromodel that establishes a direct connection between swelling processes (initiated by corrosion of the filler surface) and the resulting stress-strain state of the structure as an integral system. The main tool for taking into account the degradation of concrete in the model are the modification factors  $k_i$  for compressive strength, tensile strength and elastic modulus. These coefficients, obtained on the basis of an extensive experimental database [10], make it possible to anisotropically reduce the mechanical characteristics of concrete depending on the magnitude of deformations caused by the ASC ( $\epsilon_{ASC}$ ), the magnitude and nature of long-term operational loads (compression/tension).

2. The key tool for describing concrete degradation in the model is the modification factors ( $k_i$ ) applied to the compressive strength ( $R_b$ ), tensile strength ( $R_{bt}$ ) and elastic modulus ( $E$ ) characteristics. The specified coefficients, verified on the basis of a large array of experimental data [10], allow for anisotropic reduction of the mechanical properties of concrete depending on two key factors:

- the magnitude of free swelling deformations ( $\epsilon_{ASC}$ )
- the parameters of long-term operational loading.

3. The results of the analysis demonstrate a significant dependence of the influence of the alkali-silicate reaction on the external stress state. It has been established that compressive stresses exceeding the threshold value of 0.3 MPa have an inhibitory effect on the degradation process, which is expressed in an increase in the modification coefficients  $k_i$  with an increase in the compression level. On the contrary, tensile stresses, according to the hypothesis, should intensify the development of deformations of the joint, but this thesis requires further empirical confirmation.

4. Разработанная методика, базирующаяся на применении системы модифицирующих коэффициентов, интегрированных в среду информационной модели, представляет собой эффективный инструмент для оценки остаточного ресурса и долгосрочного прогнозирования поведения бетонных и железобетонных конструкций, подверженных щелочно-кремнеземной коррозии.

#### Литература:

1. Bazant Zdenec R., Alexandrer Steffens. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete // Cement and Concrete Research - 2000. - 30.3 - Pp. 419-438. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00270-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00270-7)
2. Mohammad S. Pourbehi, Gideon van Zijl, Breda Strasheim. Modelling of Alkali Silica Reaction in concrete structures for rehabilitation intervention // MATEC Web of Conferences 199 – 2018. – P. 11. <http://dx.doi.org/10.1051/matec-conf/201819903007>.
3. V. Troyan, N. Sova. / Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkali-silica reaction, and electric corrosion // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2019. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185613>
4. Richard A. Deschenes Jr., Eric R. Giannini, Thanos Drimalas, Benoit Fournier, W. Micah Hale. Effects of Moisture, Temperature, and Freezing and Thawing on Alkali-Silica Reaction // ACI Materials Journal 115(4) – 2018 - Pp. 575-584. <https://doi.org/10.14359/51702192>
5. Гусев Б. В., Файвусович А. С. Физико-химико-математическая модель кинетики щелочно-кремнеземистой реакции в бетоне // Инновации и инвестиции. Строительство. - 2017. - № 8. - С. 141-149.
6. Anca C. Ferche, Frank J. Vecchio Modeling of Alkali-Silica Reaction-Affected Shear-Critical Reinforced Concrete Structures // ACI Materials Journal, V. 119, 2022. Pp. 75-88. <https://doi.org/10.14359/51734331>.
7. Hansen W C. Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction produces expansion in concrete // Journal of the American Concrete Institute – 1944. - Pp. 213–227.
8. Tanaka F., Li. Kinetics of swelling and shrinking of gels // Journal of Chemical Physics - 1990. Pp. 467-470. <https://doi.org/10.1063/1.458148>.
9. Cyrille F. Dunant, Karen L. Scrivener. Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete // Cement and Concrete Research – 2012 - № 42. - Pp. 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.004>
10. Ferche, A. C., Vecchio, F. J., Mechanical Properties of Alkali-Silica Reaction Affected Concrete // ACI Materials Journal – 2022. - V. 119, No. 1. - Pp. 251-262. <https://doi.org/10.14359/51734198>
11. Myklebust E. O. Assessment of an existing bridge suffering from Alkali-Silica reaction // Norwegian University of Science and Technology - 2018. P. 184.
12. Гусев Б. В., Файвусович А. С. Математическая модель процесса сульфатной коррозии бетона с учетом физико-химических превращений // Инновации и инвестиции – 2018. - № 11. – С. 240-255.
13. Collins, R. J., Bareham, P. D., Alkali-Silica Reaction: Suppression of Expansion Using Porous Aggregate // Cement and Concrete Research - 1987. - V. 17, No. 1 - Pp. 89-96. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90063-9)
14. Rami H. Haddad, Karim S. Numayr. Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel bond //

4. The developed methodology, based on the use of a system of modifying coefficients integrated into the information model environment, is an effective tool for assessing the residual life and long-term forecasting of the behavior of concrete and reinforced concrete structures subject to alkali-silica corrosion.

#### References

1. Bazant Zdenec R., Alexandrer Steffens. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete // Cement and Concrete Research - 2000. - 30.3 - Pp. 419-438. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00270-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00270-7)
2. Mohammad S. Pourbehi, Gideon van Zijl, Breda Strasheim. Modelling of Alkali Silica Reaction in concrete structures for rehabilitation intervention // MATEC Web of Conferences 199 – 2018. – P. 11. <http://dx.doi.org/10.1051/matec-conf/201819903007>.
3. V. Troyan, N. Sova. / Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkali-silica reaction, and electric corrosion // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2019. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185613>
4. Richard A. Deschenes Jr., Eric R. Giannini, Thanos Drimalas, Benoit Fournier, W. Micah Hale. Effects of Moisture, Temperature, and Freezing and Thawing on Alkali-Silica Reaction // ACI Materials Journal 115(4) – 2018 - Pp. 575-584. <https://doi.org/10.14359/51702192>
5. Gusev B. V., Faivusovich A. S. Physicochemical-mathematical model of the kinetics of alkali-siliceous reaction in concrete // Innovatsii i investitsii. Stroitel'stvo. - 2017. - No. 8. - P. 141-149.
6. Anca C. Ferche, Frank J. Vecchio Modeling of Alkali-Silica Reaction-Affected Shear-Critical Reinforced Concrete Structures // ACI Materials Journal, V. 119, 2022. Pp. 75-88. <https://doi.org/10.14359/51734331>.
7. Hansen W C. Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction produces expansion in concrete // Journal of the American Concrete Institute – 1944. - Pp. 213–227.
8. Tanaka F., Li. Kinetics of swelling and shrinking of gels // Journal of Chemical Physics - 1990. Pp. 467-470. <https://doi.org/10.1063/1.458148>.
9. Cyrille F. Dunant, Karen L. Scrivener. Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete // Cement and Concrete Research – 2012 - № 42. - Pp. 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.004>
10. Ferche, A. C., Vecchio, F. J., Mechanical Properties of Alkali-Silica Reaction Affected Concrete // ACI Materials Journal – 2022. - V. 119, No. 1. - Pp. 251-262. <https://doi.org/10.14359/51734198>
11. Myklebust E. O. Assessment of an existing bridge suffering from Alkali-Silica reaction // Norwegian University of Science and Technology - 2018. P. 184.
12. Gusev B. V., Faivusovich A. S. Mathematical model of the process of sulfate corrosion of concrete taking into account physical and chemical transformations // Innovatsii i investitsii – 2018. - No. 11. – P. 240-255.
13. Collins, R. J., Bareham, P. D., Alkali-Silica Reaction: Suppression of Expansion Using Porous Aggregate // Cement and Concrete Research - 1987. - V. 17, No. 1 - Pp. 89-96. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90063-9)
14. Rami H. Haddad, Karim S. Numayr. Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel

Construction and Building Materials 21(2) – 2007 - Pp. 428 – 435.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.012>

15. Chirag Thummar, B. Kondraivendhan, Chetan Kumar D Modhera Review on Rebar Corrosion in Alkali-Activated Concrete Subjected to Chloride-Rich Environment // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 1326(1)– 2024. – P. 12.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012048>

16. Charlwood, R. G. Solymar, S. V., Curtis, D. D. A Review of Alkali Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams // Proceedings of the International Conference of Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Fredericton, NB, - 1992. - Pp. 220 – 224.

17. Saouma, V., and Perotti, L., Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions // ACI Materials Journal - 2006. - V. 103, No. 3. - Pp. 194-202.

bond // Construction and Building Materials 21(2) – 2007 - Pp. 428 – 435.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.012>

15. Chirag Thummar, B. Kondraivendhan, Chetan Kumar D Modhera Review on Rebar Corrosion in Alkali-Activated Concrete Subjected to Chloride-Rich Environment // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 1326(1)– 2024. – P. 12.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012048>

16. Charlwood, R. G. Solymar, S. V., Curtis, D. D. A Review of Alkali Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams // Proceedings of the International Conference of Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Fredericton, NB, - 1992. - Pp. 220 – 224.

17. Saouma, V., and Perotti, L., Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions // ACI Materials Journal - 2006. - V. 103, No. 3. - Pp. 194-202.

---

**Бахарев Максим Витальевич** – ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ))»,

E-mail: [bacharevmax@mail.ru](mailto:bacharevmax@mail.ru) (автор для связи)

**Кондращенко Валерий Иванович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник; профессор кафедры строительные материалы и технологии, ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ))»,

E-mail: [kondrashchenko@mail.ru](mailto:kondrashchenko@mail.ru)

**Вклад авторов:** Бахарев М.В. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи, Кондращенко В.И. – идея, научное руководство, редактирование статьи.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Bakharev Maxim Vitalievich** –Russian University of Transport (RUT(MIIT)),

E-mail: [bacharevmax@mail.ru](mailto:bacharevmax@mail.ru) (contact author)

**Kondrashchenko Valery Ivanovich** – Doctor of Technical Sciences, senior researcher; Professor of the Department of Building Materials and Technologies, Russian University of Transport (RUT (MIIT)),

E-mail: [kondrashchenko@mail.ru](mailto:kondrashchenko@mail.ru)

**Contribution of the author:** Bakharev M.V. – conducting experiments, processing material, writing the article, Kondrashchenko V.I. – idea, scientific supervision, editing the article.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

УДК 691.421

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.31

EDN mokfvn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-466-474

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

## ЛЕГКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДРОБЛЕННОГО ПЕНОСТЕКЛА

Николаев Д.Р.<sup>1</sup>, Жуков А.Д.<sup>1,2</sup>, Медведев А.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО "Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе"

### АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности керамического кирпича и камней связано со снижением средней плотности изделий и соответствующей теплопроводностью. Одним из возможных путей является поризация структуры керамического изделия с помощью выгорающих добавок или введения специальных пен при приготовлении керамической смеси. Другая возможность связана с введением в структуру особолегких заполнителей и, в частности, дробленого пеностекла. В статье приводятся результаты реализации данной технологии и цифровых экспериментов, устанавливающих взаимосвязь между рецептурными характеристиками и свойствами обожжённого керамического материала. Использование цифровых методик позволяет значительно сократить время и материальные расходы при проведении натурных экспериментов, а также использовать методики оценки достоверности получаемых результатов. В результате эксперимента и обработки его результатов получена номограмма с помощью которой стало возможным решение как прогностической задачи (прогнозирования свойств изделий), так и задачи подбора состава исходных глиняных смесей. Образцы обожжённые при температуре 1000–1005 °С имели среднюю плотность 1300 кг/м<sup>3</sup>; предел прочности при сжатии 14,5 МПа; теплопроводность 0,16 Вт/(м·°С). Легкий кирпич может быть использован в теплоэффективных кладках стен, но применение его в фундаментах не рекомендуется.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** керамический кирпич, дробленое пеностекло, цифровая оптимизация, статистическое планирование

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Николаев Д.Р., Жуков А.Д., Медведев А.А. Легкие керамические изделия с применением дробленого пеностекла // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 466–474. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-466-474>, EDN mokfvn

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN mokfvn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-466-474

## LIGHTWEIGHT CERAMIC PRODUCTS USING CRUSHED FOAM GLASS

Nikolaev D.R.<sup>1</sup>, Zhukov A.D.<sup>1,2</sup>, Medvedev A.A.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University

<sup>2</sup> Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

<sup>3</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting"

### ABSTRACT

Improving the efficiency of ceramic bricks and stones is associated with a reduction in the average density of the products and their corresponding thermal conductivity. One possible approach is to create pores in the ceramic structure using burnout additives or by introducing special foams during the preparation of the ceramic mixture. Another possibility involves introducing ultra-lightweight aggregates, such as crushed foam glass, into the structure. The article presents the results of the implementation of this technology and digital experiments that establish the relationship between the recipe characteristics and the properties of the fired ceramic material. The use of digital methods allows us to significantly reduce the time and material costs of conducting field experiments, as well as to use methods for assessing the reliability of the results obtained. As a result of the experiment and processing of its results, a nomogram was obtained with the help of which it became possible to solve both the prognostic problem (predicting the properties of products) and the problem of selecting the composition of the initial clay mixtures. Samples fired at 1000–1005 °C had an average density of 1300 kg/m<sup>3</sup>; compressive strength of 14.5 MPa; thermal conductivity of 0.16 W/(m·°C). Lightweight brick can be used in thermally efficient masonry walls, but its use in foundations is not recommended.

**KEY WORDS:** ceramic brick, crushed foam glass, digital optimization, statistical planning.

**FOR CITATION:** Nikolaev D.R., Zhukov A.D., Medvedev A.A. Lightweight ceramic products using crushed foam glass // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 466 – 474. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-466-474>, EDN mokfvn

## ВВЕДЕНИЕ

Обжиговые изделия на основе глин применяются в строительстве в течении тысячелетий. В Россию технология обжиговых керамических материалов и технология строительства из них пришли из Византии. До настоящего времени сохранились фрагменты керамической кладки в Десятинной церкви и действующая с VI века церковь в Керчи. Технологии развивались и одновременно происходило расширение возможностей применения керамического кирпича. Наиболее значимые постройки — это орденский замок Мариенбург и стены российских городов и крепостей, в том числе и стены Московского Кремля. В жилищном строительстве керамический кирпич зарекомендовал себя как прочный, долговечный и морозостойкий и негорючий материал, поэтому уже с XIV века и до наших дней он является одним из наиболее применяемых строительных материалов.

Серьезной проблемой керамического кирпича, которая стала заметной после принятия в конце XX века новых теплотехнических норм стала его сравнительно высокая теплопроводность и соответствующая ей средняя плотность. Отметим, что кладка кирпичной стены в 2-2,5 кирпича вполне удовлетворяла требований комфортности, но с учетом новых требований по термическому сопротивлению стен, установленный нормы оказались недостижимыми для стен из полнотелого кирпича [1, 2].

Для решения этой проблемы существуют три возможности. Во-первых, это повышение пустотности изделий до некоторого предела и не в ущерб прочностным характеристикам. Во-вторых, это поризация полнотелого кирпича. В-третьих, комбинированный способ, объединяющий два первых.

Увеличение пористости керамического кирпича может осуществляться несколькими способами. Классическим из них является способ выгорающих добавок, основанный на введении в глиняные смеси компонентов, которые выгорают в процессе обжига. Основными модификациями этого способа стали методы введения древесных опилок или отсева пенополистирола. Первый оказался неэффективным, в том числе и в виду высокой зольности древесины. Второй способ оказался нерентабельным в связи со снижением выхода отсева по причине внедрения современных и безотходных технологий гранулированного полистирола.

Вторым по значимости способом является увеличение пористости керамического кирпича за счет создания ячеистой структуры. Поризация газообразованием оказалась малоэффективной, а смешение керамических смесей со стойкими пенами позволило получить ряд положительных результатов [3, 4]. Это сделало возможным получение группы пенокерамических материалов как теплоизоляционных, так и теплоизоляционно-конструкционных. Сложности для материалов этой группы обуславливались необходимостью создания специальных пен, а также мягких режимов сушки, то есть при невысоких температурах и скоростях теплоносителя [5, 6]. В противном случае существовала опасность неравномерной усадки и оседания или растрескивание керамического сырца. Введение в состав глиняных пеномасс легких наполнителей, например тонкодисперсных сферических частиц позволяет как снизить время сушки, так и повысить прочность за счет армирующего эффекта. Формовочная смесь армировалась дополнительно тонкодисперсными волокнами. В качестве подобных наполнителей использовались зольные микросферы, диатомит и другие подобные им

## INTRODUCTION

Clay-based fired products have been used in construction for thousands of years. The technology of firing ceramic materials and the technology of construction from them came to Russia from Byzantium. Fragments of ceramic masonry in the Church of the Tithes and a church in Kerch, which has been in operation since the 6th century, have survived to this day. Technologies have developed and at the same time the possibilities for using ceramic bricks have expanded. The most significant buildings are the Order's castle of Marienburg and the walls of Russian cities and fortresses, including the walls of the Moscow Kremlin. In housing construction, ceramic brick has proven itself as a strong, durable, frost-resistant and non-flammable material, which is why, from the 14th century to the present day, it has been one of the most widely used building materials.

A serious problem with ceramic bricks, which became noticeable after the adoption of new thermal engineering standards at the end of the 20th century, was their relatively high thermal conductivity and corresponding average density. It should be noted that laying a brick wall of 2-2.5 bricks fully satisfied the requirements of comfort, but taking into account the new requirements for the thermal resistance of walls, the established standards turned out to be unattainable for walls made of solid brick [1, 2].

There are three possible solutions to this problem. First, increasing the void content of the bricks to a certain limit without compromising their strength. Second, porosity of solid bricks. Third, a combined method combining the first two.

Increasing the porosity of ceramic bricks can be accomplished in several ways. The classic of these is the method of burnout additives, based on the introduction of components into clay mixtures that burn out during the firing process. The main modifications of this method were the methods of introducing wood sawdust or polystyrene foam screenings. The first one turned out to be ineffective, including due to the high ash content of the wood. The second method turned out to be unprofitable due to the decrease in the output of screenings due to the introduction of modern and waste-free technologies of granulated polystyrene.

The second most important method is to increase the porosity of ceramic bricks by creating a cellular structure. Porization by gas formation turned out to be ineffective, and mixing ceramic mixtures with stable foams made it possible to obtain a number of positive results [3, 4]. This made it possible to obtain a group of foam ceramic materials, both thermal insulation and thermal insulation-structural. The difficulties for materials in this group were caused by the need to create special foams, as well as soft drying modes, that is, at low temperatures and coolant speeds [5, 6]. Otherwise, there was a risk of uneven shrinkage and subsidence or cracking of the ceramic adobe. The introduction of lightweight fillers, such as finely dispersed spherical particles, into the composition of clay foams allows for both a reduction in drying time and an increase in strength due to the reinforcing effect. The molding mixture was additionally reinforced with finely dispersed fibers. Ash microspheres, diatomite, and other similar substances were used as such fillers. The products are fired for 26-28 hours at a maximum temperature of 1100°C [7, 8].

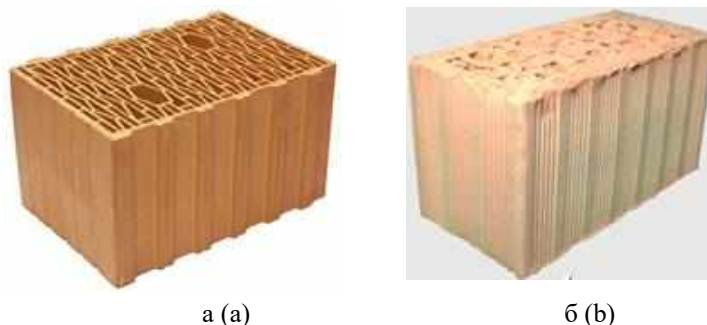
вещества. Обжиг изделий осуществляется в течение 26-28 часов при максимальной температуре 1100 °С [7, 8].

Получение изделий повышенной пустотности осуществлялось параллельно с увеличением их объема. Вместо одинарного кирпича делали полуторный или двойной, а дальнейшее совершенствование технологии сделало возможным изготовление керамических камней. Неплохие результаты были получены в результате объединения технологии многопустотных камней с пенным способом (рис. 1) [9, 10].

**РИСУНОК 1**

**КЕРАМИЧЕСКИЕ КАМНИ [9.10]:**

- a – пустотный;
- б – пустотно-пористый



**Figure 1**

**Ceramic stones [9.10]:**

- a – hollow;
- b – hollow-porous

Легкие керамические камни зарекомендовали себя как материал, который имеет множество полезных свойств. Они очень прочные, являются хорошим теплоизолятором и могут быть использованы в самых разных сферах человеческой деятельности. Проблемой в этом случае стала технология монтажа стен. Во-первых, вес одного керамического камня не позволял его размещать в кладке также легко как одинарный или полуторный облегченный кирпич. Во-вторых, в пустоты мог проваливаться кладочный раствор, что с одной стороны приводило к его повышенному расходу, а с другой — снижало термическое сопротивление конструкции за счет частичного заполнения пустот раствором.

Одним из направлений решения проблем получения изделий относительно низкой плотностью и теплопроводностью при сохранении прочностных и эксплуатационных характеристик могло стать введение легких заполнителей в керамические смеси. Рассматривались различные варианты и приемлемым стало применением вспученного перлитового песка, что позволило сформировать еще одно технологическое направление – технологию перлитокерамических изделий. Перлитовый песок обладает очень высокой и открытой пористостью, что предполагало использованием смесей с повышенным водосодержащим, а следовательно, и длительную сушку сырья [11, 12].

Поиск альтернативных видов заполнителей осуществлялся как в направлениях использования природных пористых материалов (что не привело к положительным результатам), так и в направлениях использования промышленных продуктов или промышленных отходов. В связи с этим на наш взгляд было изучение возможности использования дробленого пеностеклянного щебня, применение которого в настоящее время адаптируется в качестве легкого заполнителя для цементных или бесцементных бетонов [13].

Поризация структуры широко применяется при получении строительных материалов различного назначения [14-18].

The production of products with increased emptiness was carried out in parallel with the increase in their volume. Instead of single bricks, they made one-and-a-half or double bricks, and further improvements in technology made it possible to produce ceramic stones. Good results were obtained by combining the technology of hollow stones with the foam method (Fig. 1) [9, 10].

Lightweight ceramic stones have proven themselves to be a material with many beneficial properties. They are very durable, are good thermal insulators and can be used in a wide variety of areas of human activity. The problem in this case was the technology of wall installation. Firstly, the weight of one ceramic stone did not allow it to be placed in the masonry as easily as a single or one and a half lightweight brick. Secondly, the mortar could fall into the voids, which, on the one hand, led to its increased consumption, and on the other, reduced the thermal resistance of the structure due to the partial filling of the voids with mortar.

One of the directions for solving the problem of obtaining products with relatively low density and thermal conductivity while maintaining strength and performance characteristics could be the introduction of lightweight fillers into ceramic mixtures. Various options were considered and the use of expanded perlite sand became acceptable, which made it possible to form another technological direction – the technology of perlite ceramic products. Perlite sand has a very high and open porosity, which required the use of mixtures with increased water content and, consequently, long-term drying of the raw material [11, 12].

The search for alternative types of fillers was carried out both in the areas of using natural porous materials (which did not lead to positive results), and in the areas of using industrial products or industrial waste. In this regard, in our opinion, the possibility of using crushed foam glass aggregate, the use of which is currently being adapted as a lightweight filler for cement or cement-free concrete, was studied [13].

Porization of the structure is widely used in the production of building materials for various purposes [14-18].

Thus, based on the results of the above review, a number of conclusions can be drawn:

- firstly, building ceramic products retain their position as one of the most widely used materials.

Таким образом, по результатам приведенного обзора можно сделать ряд заключений:

- во-первых, изделия строительной керамики сохраняют свой положение как одного из наиболее применяемых материалов.

- во-вторых, в случае их применения как стенового материала необходимо снижать их плотность и теплопроводность при сохранении эксплуатационных характеристик.

- в-третьих, наиболее перспективным является использование легкого заполнителя, который позволит сохранить основные характеристик производственного процесса и позволит изготавливать изделия на том же оборудовании при условии сохранения материалом эксплуатационных характеристик при снижении теплопроводность и средней плотности.

**Целью исследований**, изложенных в статье, стало проведение исследований по разработке рецептур и технологии пеностекольных керамических материалов.

### **Методы исследований**

Основой методологии исследований были цифровые методики планирования и обработки результатов эксперимента, а также метод аналитической оптимизации, разработанный в НИУ МГСУ. Концепция аналитической оптимизации [19,20] основана на двух положениях. Во-первых, полученная математическая модель (в виде полинома) соответствует реальному процессу, т.е. описывает его с определенной точностью. Во-вторых, математическая модель является алгебраической нелинейной функцией нескольких переменных, которая может быть использована для выполнения всевозможных операций с аппаратом математического анализа.

Следующие этапы включают в себя интерпретацию полученного оптимизированного полинома (аналитическая, физическая и графическая) с целью проверки или подтверждения расчетных результатов. Далее осуществляется формирование алгоритма технологического процесса с использованием оптимизированных функций и составлением программ для ЭВМ.

Применение в качестве наполнителя измельченного (дробленого) пеностекольного щебня. Не только изменяет условия тепло- и массопереноса при сушке, но и влияет как на свойства материала, так и на режимы обжига легких керамических изделий. Как показывают результаты по оптимизации параметров переменного режима сушки, высокое качество изделий получено при ограничивающим сроке сушки 16 ч. Дробленый пеностекольный щебень полностью совместим с керамическим черепком (в том числе по показателям спекаемости и температурных деформаций) и имеет невысокую среднюю плотность (80 – 140 кг/м<sup>3</sup>).

Технологические параметры обжига легкого керамического сырца непосредственно связаны с составом сырца и исходных керамических смесей, что и было учтено при формировании плана эксперимента.

Оптимизация состава керамической смеси с учетом свойств наполнителя проводилась с помощью цифровых методов в трехфакторном эксперименте. В качестве варьируемых факторов приняты:

- средняя плотность измельченного пеностекла ( $X_1$ );
- расход измельченного пеностекла ( $X_2$ );
- средний размер частиц пеностекла ( $X_3$ ).

В качестве функций отклика – прочность изделия при сжатии ( $Y_1$ ) и его средняя плотность ( $Y_2$ ).

- secondly, if they are used as wall material, it is necessary to reduce their density and thermal conductivity while maintaining their performance characteristics.

- thirdly, the most promising is the use of lightweight filler, which will preserve the main characteristics of the production process and allow the manufacture of products on the same equipment, provided that the material maintains its performance characteristics while reducing thermal conductivity and average density.

**The aim of the research** presented in the article was to conduct research on the development of formulations and technology for foam glass ceramic materials.

### **Research methods**

The research methodology was based on digital methods for planning and processing experimental results, as well as the analytical optimization method developed at the National Research University Moscow State University of Civil Engineering. The concept of analytical optimization [19,20] is based on two provisions. Firstly, the resulting mathematical model (in the form of a polynomial) corresponds to the real process, i.e. describes it with a certain accuracy. Secondly, the mathematical model is an algebraic nonlinear function of several variables, which can be used to perform all kinds of operations with the apparatus of mathematical analysis.

The next steps include the interpretation of the obtained optimized polynomial (analytical, physical and graphical) in order to verify or confirm the calculated results. Next, the algorithm for the technological process is formed using optimized functions and the creation of computer programs.

The use of crushed (crushed) foam glass aggregate as a filler not only alters heat and mass transfer conditions during drying but also influences both the material properties and the firing conditions for lightweight ceramic products. As the results of optimizing the parameters of the variable drying mode show, high quality products were obtained with a drying time limit of 16 hours. Crushed foam glass rubble is completely compatible with ceramic shards (including in terms of sintering properties and temperature deformations) and has a low average density (80–140 kg/m<sup>3</sup>).

The technological parameters for firing light ceramic green bricks are directly related to the composition of the green bricks and the initial ceramic mixtures, which was taken into account when developing the experimental plan.

Optimization of the ceramic mixture composition, taking into account the filler properties, was conducted using digital methods in a three-factor experiment. The following factors were used as variable factors:

- average density of crushed foam glass ( $X_1$ );
- consumption of crushed foam glass ( $X_2$ );
- average particle size of foam glass ( $X_3$ ).

The response functions are the compressive strength of the product ( $U_1$ ) and its average density ( $U_2$ ).

The adequacy of the models was tested using Fisher's criterion; the significance of the coefficients of the regression equations was tested by comparison with the

Адекватность моделей проверялась по критерию Фишера; значимость коэффициентов уравнений регрессии – путем сравнения с доверительным интервалом, определяемом по критерию Стьюдента и дисперсии параллельных опытов.

Сушка образцов 50x50x50 мм проводилась в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 90 °С при скорости теплоносителя 4 м/с. Длительность сушки составляла 6 часов. Обжиг образцов осуществлялся в лабораторной печи при температуре 1000–1005 °С. Условия эксперимента представлены в таблице 1.

confidence interval determined using Student's t-test and the variance of parallel experiments.

Drying of 50x50x50 mm samples was carried out in a drying oven to constant weight at a temperature of 90 °C with a coolant velocity of 4 m/s. The drying time was 6 hours. The samples were fired in a laboratory furnace at a temperature of 1000–1005 °C. The experimental conditions are presented in Table 1.

**ТАБЛИЦА 1 УСЛОВИЯ ТРЕХФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**  
**Table 1 Conditions of the three-factor experiment**

Наименование фактора Name of the factor	Символ Symbol $X_i$	Среднее значение фактора, Average value of the factor $\bar{X}_i$	Интервал варьирования, Variation interval $\Delta X_i$	Значения фактора на уровнях Factor values at levels	
				-1	+1
Средняя плотность измельченного пеностекла, кг/м <sup>3</sup> Average density of crushed foam glass, kg/m <sup>3</sup>	$X_1$	120	40	80	160
Расход измельченного пеностекла, кг/м <sup>3</sup> Consumption of crushed foam glass, kg/m <sup>3</sup>	$X_2$	36	8	28	44
Средний размер частиц пеностекла, мм Average particle size of foam glass, mm	$X_3$	0,5	0,2	0,3	0,7

**Результаты и их обсуждение**

Были получены уравнения регрессии. После проверки значимости коэффициентов (с доверительным интервалом для прочности 0,2 МПа и средней плотности 9 кг/м<sup>3</sup>) были получены следующие математические модели:

$$Y_1 = 13,6 + 0,8X_1 - 1,7X_2 + 0,7X_3 + 0,6X_2X_3 - 0,4X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 1378 + 18X_1 - 51X_2 + 14X_3 + 8X_2X_3 \quad (2)$$

Мониторинг вычисления регрессии разрешает сделать следующие выводы. На прочность при сжатии (полином 1) наибольшее влияние оказывает расход измельченного пеностекла (коэффициент при  $X_2$ ). Так как прочность пеностекла ниже прочности керамического черепка, то увеличение расхода пеностекла обуславливает снижение прочности. Увеличение плотности пеностекла предполагает также увеличение его прочности, что положительно сказывается на функции отклика (коэффициент при  $X_1$ ). Влияние среднего размера частиц пеностекла влияет на прочность обожжённого образца неоднозначно. При увеличении размеров частиц до определенного значения прочность растет (коэффициент при  $X_3$ ), а при больших значениях начинает снижаться (коэффициент при  $X_3^2$ ). Это может быть связано с плотностью упаковки частиц пеностекла в керамической матрице.

Средняя плотность легкого керамического материала (полином 2) в наибольшей степени зависит от расхода измельченного пеностекла (коэффициент при  $X_2$ ), так как плотность пеностекла ниже плотности керамической матрицы; при этом при увеличении плотности пеностекла плотность материала возрастает (коэффициент при  $X_2$ ). При увеличении размеров частиц пеностекла прочность незначительно, но возрастает (коэффициент при  $X_3$ ), что

**Results and discussion**

Regression equations were obtained. After checking the significance of the coefficients (with a confidence interval for strength of 0.2 MPa and an average density of 9 kg/m<sup>3</sup>), the following mathematical models were obtained:

Monitoring the regression calculations allows us to draw the following conclusions. The consumption of crushed foam glass (coefficient at  $X_2$ ) has the greatest influence on the compressive strength (polynomial 1). Since the strength of foam glass is lower than the strength of ceramic shards, an increase in the consumption of foam glass leads to a decrease in strength. An increase in the density of foam glass also implies an increase in its strength, which has a positive effect on the response function (coefficient at  $X_1$ ). The influence of the average particle size of foam glass on the strength of the fired sample is ambiguous. As particle size increases to a certain value, strength increases (coefficient at  $X_3$ ), but at larger values, it begins to decrease (coefficient at  $X_3^2$ ). This may be due to the packing density of the foam glass particles in the ceramic matrix.

The average density of a lightweight ceramic material (polynomial 2) depends to the greatest extent on the consumption of crushed foam glass (coefficient of  $X_2$ ), since the density of foam glass is lower than the density of the ceramic matrix; however, with an increase in the density of foam glass, the density of the material increases (coefficient of  $X_2$ ). With an increase in the size of foam glass particles, the strength increases slightly (coefficient at  $X_3$ ), which is explained by the higher density of highly crushed foam glass particles.

объясняется большей плотностью сильно измельченных частиц пеностекла.

Изготовленные по проведенной технологии керамические камни приобретают усредненные показатели теплопроводности не более 0,16 Вт/(м·К) и могут быть использованы при выполнении высокоэффективной кладки кирпичных стен.

### Аналитическая оптимизация результатов активного эксперимента

Квадратичные зависимости по фактору  $X_3$  (средний размер частиц пеностекла). Зависимости (1 и 2) являются как моделями, адекватно описывающими функции отклика, так и алгебраическими полиномами, что делает целесообразным применение метода аналитической оптимизации.

#### Оптимизация по фактору $X_3$ (средний размер частиц пеностекла)

1). Определяем частную производную функции  $Y_1(X_1, X_2, X_3)$ , приравниваем результат 0 и определяем оптимальное значение среднего размера частиц пеностекла ( $dп$ ):

$$\partial Y_1 / \partial Y_2 = 0,7 - 0,8X_3 \rightarrow X_3 = 7/8 = 0,88$$

Натуральную величину оптимального размера части пеностекла определяем, используя данные таблицы 1:

$$dп = 0,5 + 0,88 \times 0,2 = 0,68 - 0,69 \text{ мм}$$

2). Получаем модели, оптимизированные по оптимальному размеру частиц пеностекла и по температуре обжига:

$$Y_1 = 14,9 + 0,8X_1 - 1,0X_2 \quad (3)$$

$$Y_2 = 1404 + 18X_1 - 41X_2 \quad (4)$$

Графическая интерпретация оптимизированных зависимостей (3 и 4) дала возможность сформировать номограмму (рис. 2). Позволяющую прогнозировать свойства изделий, а также осуществлять подбор состава керамических смесей для изготовления легких керамических изделий.

### РИСУНОК 2

#### НОМОГРАММА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ПОДБОР СОСТАВА ИЗДЕЛИЙ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ РАЗМЕРЕ ЧАСТИЦ РАЗМЕЛЬЧЕННОГО ПЕНОСТЕКЛА (0,68-0,69 мм)

Средняя плотность, кг/м<sup>3</sup>: а – 1320; б – 1360; в – 1400. Прочность при сжатии, МПа: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13

Figure 2

Nomogram for predicting parameters and selecting product composition with the optimal particle size of crushed foam glass (0.68-0.69 mm).

Average density, kg/m<sup>3</sup>: a – 1320; b – 1360; c – 1400. Compressive strength, MPa: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13

Ceramic stones produced using the technology developed have average thermal conductivity values of no more than 0.16 W/(m·K) and can be used in highly efficient brickwork.

### Analytical optimization of active experiment results

Quadratic dependencies for factor  $X_3$  (average particle size of foam glass). Dependencies (1 and 2) are both models that adequately describe the response functions and algebraic polynomials, making it appropriate to use the analytical optimization method.

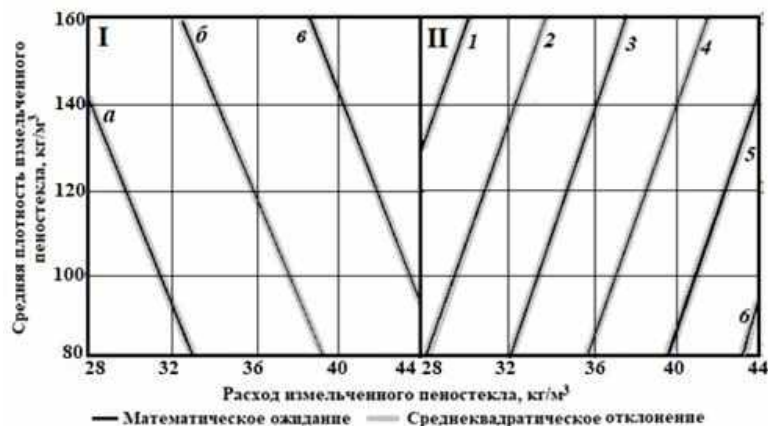
#### Optimization by factor $X_3$ (average particle size of foam glass)

1). We determine the partial derivative of the function  $Y_1(X_1, X_2, X_3)$ , equate the result to 0 and determine the optimal value of the average particle size of foam glass ( $dп$ ):

The natural size of the optimal size of a piece of foam glass is determined using the data in Table 1:

2). We obtain models optimized for the optimal size of foam glass particles and firing temperature:

Graphical interpretation of the optimized dependencies (3 and 4) made it possible to generate a nomogram (Fig. 2), which allows for predicting the properties of products, as well as selecting the composition of ceramic mixtures for the production of lightweight ceramic products.



Номограмма состоит из двух секторов. В секторе I устанавливается взаимосвязь между средней плотностью обожжённых изделий и средней плотностью, а также расходом измельченного пеностекляного щебня; в секторе II — устанавливается взаимосвязь между прочностью при сжатии обожжённых изделий и средней плотностью, а также расходом измельченного пеностекляного щебня.

Керамические образцы, изготовленные в соответствии с описанным выше методом (рис. 3), имеют среднюю теплопроводность менее  $0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Марка по морозостойкости глиняного кирпича от F35. Легкий кирпич может быть использован в теплоэффективных кладках стенах, но применение его в фундаментах не рекомендуются. Изготавливаются керамические изделия могут как полнотелыми, так и с пустотами, возможно изготовление модульного керамического кирпича, а также крупноформатных керамических камней.

### РИСУНОК 3

#### ОБОЖЖЁННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ НА ОСНОВЕ ПЕНОСТЕКЛА.

Температура обжига  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Средняя плотность  $1300 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

Предел прочности при сжатии  $14,5 \text{ МПа}$ .

Figure 3

Fired ceramic samples based on foam glass.

Firing temperature:  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Average density:  $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;

Compressive strength:  $14.5 \text{ MPa}$ .



### Заключение

Использование цифровых методик позволяет значительно сократить время и материальные расходы при проведении натурных экспериментов, а также использовать методики оценки достоверности получаемых результатов. В результате эксперимента и обработки его результатов получена номограмма с помощью которой стало возможным решение как прогностической задачи (прогнозирования свойств изделий), так и задачи подбора состава исходных глиняных смесей.

Образцы обожженные при температуре  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$  имели среднюю плотность  $1300 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; предел прочности при сжатии  $14,5 \text{ МПа}$ ; теплопроводность  $0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

Легкий кирпич может быть использован в теплоэффективных кладках стенах, но применение его в фундаментах не рекомендуются.

### Литература:

1. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 8–13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>
2. Korneyev A., Egorova E. Highly Efficient Glass Ceramic Thermal Insulation / E3S Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301017>
3. Kiani S., Jafarzadeh M. Glass-Ceramic Foams from Alkali-Activated Vitrified Bottom Ash and Waste Glasses / MDPI Applied Sciences (2020). <https://doi.org/10.3390/app10165714>

The nomogram consists of two sectors. Sector I establishes the relationship between the average density of fired products and the average density, as well as the consumption of crushed foam glass aggregate; Sector II establishes the relationship between the compressive strength of fired products and the average density, as well as the consumption of crushed foam glass aggregate.

Ceramic samples manufactured using the method described above (Fig. 3) have an average thermal conductivity of less than  $0.16 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ . The frost resistance grade of clay bricks starts from F35. Lightweight bricks can be used in thermally efficient masonry walls, but their use in foundations is not recommended. Ceramic products can be manufactured as solid or hollow bricks; modular ceramic bricks and large-format ceramic stones are also possible.

### Conclusion

The use of digital methods allows for a significant reduction in the time and material costs of conducting field experiments, as well as the use of methods for assessing the reliability of the results obtained. As a result of the experiment and processing of its results, a nomogram was obtained, with the help of which it became possible to solve both the prognostic problem (predicting the properties of products) and the problem of selecting the composition of the initial clay mixtures.

Samples fired at a temperature of  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$  had an average density of  $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; compressive strength of  $14.5 \text{ MPa}$ ; thermal conductivity of  $0.16 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ .

Lightweight brick can be used in thermally efficient masonry walls, but its use in foundations is not recommended.

### References

1. Rubtsov O.I., Bobrova E.Yu., Zhukov A.D., Zinovieva E.A. Ceramic brick, stones and solid brick walls // *Stroitel'nyye materialy*. 2019. No. 9. pp. 8–13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>
2. Korneyev A., Egorova E. Highly Efficient Glass Ceramic Thermal Insulation / E3S Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301017>
3. Kiani S., Jafarzadeh M. Glass-Ceramic Foams from Alkali-Activated Vitrified Bottom Ash and Waste Glasses / MDPI Applied Sciences (2020). <https://doi.org/10.3390/app10165714>
4. Aleksey Zhukov; Andrej Ushakov; Olimdzhon Rasulov;

4. Aleksey Zhukov; Andrej Ushakov; Olimdzhon Rasulov; Ekaterina Mihailik. A Heat-efficient ceramic products based on modified rice straw // AIP Conference Proceedings 2497, 040005 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0110394>
5. Пилипенко А.С., Каддо М.Б., Асаматдинов М.О., Турганбаев Б.Б. Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 86–91. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>
6. Miao, X., et al. 3D Printing of Porous Ceramics for Enhanced Thermal Insulation Properties / PMC (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202412554>
7. Колдомасова И.В., Козлов А.В., Каклюгин А.В. Крупно-размерные ячеистые керамические материалы с использованием алюмосиликатного микросферического наполнителя и минеральных волокон // «Строительство-2005»: Материалы междунар. науч.-практ. конф. - Ростов-н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2005. -С. 9-10.
8. Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 4. – С. 213–221. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221> .
9. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 4. – С. 75–100. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100> .
10. Zhukov, A. D., Popov, I. I., Bessonov, I. V., & Chernukhin, S. P. (2021). Filled Heat Efficient Ceramics // Key Engineering Materials, May 2021 vol. 887, 493–498. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.493>
11. Завадский В.Ф., Путро Н.Б. Поризованная строительная керамика. – Новосибирск: Сибстрин, 2005. – 100 с.
12. Самедов, Ахмед Меджид Оглы, Самедов, А. М. Перлитокерамические изделия [науч. ред. канд. техн. наук А. И. Полинковская]. Москва. Стройиздат. 1985 г. 195 С.
13. Панченко, А. И. Пеностеклобетон с модифицированным гипсовым вяжущим: свойства, технология и применение / А. И. Панченко, В. А. Михайлов // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 3(104). С. 71-78.
14. Математическое моделирование физико-химических процессов в пористых средах при решении задач создания нанокomпозиционных материалов и влагонаполнения / В. В. Кузина, С. В. Самченко, И. В. Козлова, А. Н. Кошев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 298-309. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-298-309>. – EDN NIOSQQ.
15. Дворников, Р. М. Формирование ячеистой структуры поризованного арболита / Р. М. Дворников, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 1. – С. 82-91. – EDN KWN1QT.
16. Новиков Н.В. Влияние барит содержащей добавки на свойства ячеистых бетонов / Самченко С.В., Новиков Н.В. // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 4, С. 335-341.
17. Хеирбеков, Р. А. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликатного поризованного арболитового материала / Р. А. Хеирбеков, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 379-390. – EDN JKBDQD.
18. Samchenko, S. V. Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // Buildings. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17. – <https://doi.org/10.3390/buildings14010017> . – EDN WLXSWL.
19. Mukhammad-Basir Kodzoev, Sergey Isachenko, Ekaterina Bobrova, Boris Efimov and Igor Bessonov // Ceramic prod-
- Ekaterina Mihailik. A Heat-efficient ceramic products based on modified rice straw // AIP Conference Proceedings 2497, 040005 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0110394>
5. Pilipenko A.S., Kaddo M.B., Asamatdinov M.O., Turganbaev B.B. Warm ceramics based on local raw materials of the Republic of Karakalpakstan // *Stroitel'nyye materialy*. 2022. No. 11. P. 86–91. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>
6. Miao, X., et al. 3D Printing of Porous Ceramics for Enhanced Thermal Insulation Properties / PMC (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202412554>
7. Koldomasova I.V., Kozlov A.V., Kaklyugin A.V. Large-sized cellular ceramic materials using aluminosilicate microspherical filler and mineral fibers // "Construction-2005": Proc. of the international. scientific-practical. conf. - Rostov-on-Don: Rostov state construction university, 2005. - P. 9-10.
8. Sinityn D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for construction purposes: production and application technology // *Nanotechnologies in Construction*. - 2021. - Vol. 13, No. 4. - P. 213–221. - <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221> .
9. Kudryavtsev P.G. Composition and structure of porous heat-resistant inorganic composite materials // *Nanotechnology in construction*. - 2018. - Vol. 10, No. 4. - P. 75-100. - <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>.
10. Zhukov, A. D., Popov, I. I., Bessonov, I. V., & Chernukhin, S. P. (2021). Filled Heat Efficient Ceramics // *Key Engineering Materials*, May 2021 vol. 887, 493–498. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.493>
11. Zavadskiy V.F., Putro N.B. Porous construction ceramics. – Novosibirsk: Sibstrin, 2005. – 100 p.
12. Samedov, Akhmed Majid Ogly, Samedov, A. M. Perlitoceramic products [scientific editor, Cand. of Technical Sciences A. I. Polinkovskaya]. Moscow. Stroyizdat. 1985. 195 p.
13. Panchenko, A. I. Foam glass concrete with modified gypsum binder: properties, technology and application / A. I. Panchenko, V. A. Mikhailov // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2024. No. 3 (104). P. 71-78.
14. Mathematical modeling of physical and chemical processes in porous media in solving the problems of nanocomposite materials and water-filling / V. V. Kuzina, S. V. Samchenko, I. V. Kozlova, A. N. Koshev // *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 298-309. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-298-309>. – EDN JROCSH.
15. Dvornikov, R. M. Formation of the cellular structure of porous arbolite / R. M. Dvornikov, S. V. Samchenko // *Engineering and technology of silicates*. - 2022. - Vol. 29, No. 1. - Pp. 82-91. - EDN KWN1QT.
16. Novikov N.V. Influence of barite-containing additives on the properties of cellular concrete / Samchenko S.V., Novikov N.V. // *Engineering and technology of silicates*. - 2022. - Vol. 29, No. 4, Pp. 335-341.
17. Kheirbekov, R. A. Some physicochemical aspects of the formation of the structure of composite slag-silicate porous arbolite material / R. A. Kheirbekov, S. V. Samchenko // *Engineering and technology of silicates*. - 2022. - Vol. 29, No. 4. - P. 379-390. - EDN JKBDQD.
18. Samchenko, S. V. Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17. – <https://doi.org/10.3390/buildings14010017> . – EDN WLXSWL.
19. Mukhammad-Basir Kodzoev, Sergey Isachenko, Ekaterina Bobrova, Boris Efimov and Igor Bessonov // *Ceramic prod-*

19. Mukhamad-Basir Kodzoev, Sergey Isachenko, Ekaterina Bobrova, Boris Efimov and Igor Bessonov // Ceramic products and energy-efficient systems 032006// FORM-2020. С. 23-26. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032006>

20. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демиссе Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // «Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал». – 2020. – Том 12, № 6. – С. 313–319. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>.

ucts and energy-efficient systems 032006// FORM-2020. С. 23-26. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032006>

20. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demisse B.A. Application of statistical methods for solving problems of construction materials science // “Nanotechnology in construction: scientific online journal”. - 2020. - Vol. 12, No. 6. - P. 313–319. - <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>.

**Николаев Даниил Романович** – аспирант кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), специалист отдела управления проектами, компании АО "ШУКО Интернационал Москва"  
E-mail: [nikolaev.daniil.2002@yandex.ru](mailto:nikolaev.daniil.2002@yandex.ru) (автор для связи)

**Nikolaev Daniil Romanovich** – postgraduate student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), specialist of the project management department of the company JSC SHUKO International Moscow  
E-mail: [nikolaev.daniil.2002@yandex.ru](mailto:nikolaev.daniil.2002@yandex.ru) (contact author)

**Жуков Алексей Дмитриевич** – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), член-корреспондент Российской инженерной академии (РИА).  
E-mail: [lj211@yandex.ru](mailto:lj211@yandex.ru)

**Zhukov Aleksey Dmitrievich** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Leading Researcher of the Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Corresponding Member of the Russian Engineering Academy (RIA).  
E-mail: [lj211@yandex.ru](mailto:lj211@yandex.ru)

**Медведев Андрей Александрович** – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), доцент кафедры геофизики Российского геологоразведочного университета (РГГРУ-МГРИ). E-mail: [medvedev747@yandex.ru](mailto:medvedev747@yandex.ru)

**Medvedev Andrey Aleksandrovich** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Associate Professor of the Department of Geophysics of the Russian Geological Prospecting University (RGGRU-MGRI).  
E-mail: [medvedev747@yandex.ru](mailto:medvedev747@yandex.ru)

**Вклад авторов:** Николаев Д.Р. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи, Медведев А.А. – идея, обработка материала, написание статьи, Жуков А.Д. – идея, научное руководство, редактирование статьи.

**Contribution of the author:** Nikolaev D.R. – conducting experiments, processing material, writing the article, Medvedev A.A. – idea, processing material, writing the article, Zhukov A.D. – idea, scientific supervision, editing the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

УДК 666.972.165

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.15.39

Научная специальность ВАК: 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)

EDN shtbmo

DOI 10.62980/2076-0655-2026-475-484

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДОБАВОК МОДИФИКАТОРОВ

Урбанов А.В.<sup>1</sup>, Потапова Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

---

### АННОТАЦИЯ

В работе изучено влияние двух добавок модификаторов, отличающихся химическим составом (SE-75 на основе композиции изопропанолламинов и углеводов и SE-25 на основе композиции алканолламинов и углеводов) на характеристики бетонов на основе различных цементов. Установлено, что в зависимости от типа применяемого вяжущего материала химические добавки по-разному влияют на прочностные характеристики бетонов. Введение SE-75 и SE-25 позволяет увеличить сохраняемость бетонной смеси, без потери прочностных характеристик на ранних этапах твердения. Установлено, что замещение части цемента активной минеральной добавкой, а также применение модификатора позволяет существенно увеличить прочностные характеристики бетонов при сравнении с составами на основе чистого цемента. Установлено, что применение добавок в дозировке 0,3–0,5 % обеспечивает повышение прочности на сжатие в возрасте 28 сут до 20 %. Альтернативным путем является снижение количества цемента в составе бетона на 10 % без потери эксплуатационных характеристик, позволяющее уменьшить себестоимость бетонной смеси на 200 руб., что положительно влияет на экономическую и экологическую составляющую.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цемент, бетонная смесь, прочность, добавки модификаторы, гидратация, растворение, характеристики.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Урбанов А.В., Потапова Е.Н. Повышение эффективности характеристик бетонов при использовании добавок модификаторов // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 475-484. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-475-484>, EDN shtbmo

Type of article - scientific article

OECD 2.04 Chemical engineering

II ENGINEERING, CHEMICAL

EDN shtbmo

DOI 10.62980/2076-0655-2026-475-484

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF CONCRETE PROPERTIES USING MODIFIER ADMIXTURES

Urbanov A.V.<sup>1</sup>, Potapova E.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

---

### ABSTRACT

The article studies the effect of two modifier admixtures with different chemical compositions (SE-75 based on a composition of isopropanolamines and carbohydrates, and SE-25 based on a composition of alkanolamines and carbohydrates) on the properties of concrete based on different cements. It was found that the chemical additives have different effects on the strength properties of concrete, depending on the type of binder used. The addition of SE-75 and SE-25 improves the durability of the concrete mixture without compromising its strength in the early stages of hardening. It has been established that replacing part of the cement with an active mineral additive, as well as using a modifier, significantly increases the strength characteristics of concrete compared to those based on pure cement. It has been found that using additives at a dosage of 0.3-0.5% increases compressive strength at 28 days by up to 20%. An alternative approach is to reduce the amount of cement in the concrete by 10% without compromising the performance.

**KEY WORDS:** cement, concrete mix, strength, modifier admixtures, hydration, dissolution, characteristics

**FOR CITATION:** Urbanov A.V., Potapova E.N. Improving the efficiency of concrete properties using modifier admixtures // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 475 – 484. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-475-484>, EDN shtbmo

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций цементной промышленности на сегодняшний день является снижение выбросов  $\text{CO}_2$  путем применения более эффективных технологий производства, использования альтернативного топлива, а также снижение содержания клинкера в цементе. Исследования последних десятилетий направлены на изучения различных видов минеральных компонентов, вводимых в состав цемента [1-3]. В первую очередь это делается для снижения себестоимости продукции, а также для уменьшения выбросов в атмосферу так называемого парникового газа.

Основными сырьевыми материалами, используемыми в качестве минеральных добавок (МД), являются металлургические шлаки, золы-уноса, пуццоланы и микрокремнезем [4-8]. Основным механизмом действия МД направлено на взаимодействие образующегося в ходе гидратации цемента  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (в химии цемента принято называть портландитом) и  $\text{SiO}_2$  различных модификаций, являющихся основным компонентом минеральных добавок. В ходе таких химических реакций образуется дополнительное количество гидросиликатов кальция, которые обладают большей прочностью в сравнении с портландитом [9-10]. Металлургические шлаки являются отходами производства металлургической промышленности и, если ранее их стоимость была существенно ниже себестоимости клинкера, то в настоящее время цена на такие материалы может составлять более половины его стоимости, что негативно сказывается на экономической составляющей.

Также в качестве минеральных добавок при производстве цемента принято использовать различные известняки [11]. Однако, в связи с тем, что они являются компонентами, не участвующими в процессах гидратации, их применение ограничено: данные типы цемента нельзя использовать в ответственных конструкциях, таких как аэродромные покрытия, дорожные и мостовые конструкции, гидротехнические сооружения, а также в железобетонных изделиях (ГОСТ Р 55224-2020<sup>5</sup>).

Еще одним косвенным способом снижения выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу является повышение эксплуатационных характеристик бетонов (прочности) путем снижения водо-вяжущего отношения при применении высокотехнологичных пластификаторов или введение в состав бетонных смесей особых добавок модификаторов, позволяющих увеличивать прочностные показатели изделия на основе бетонов [12]. Основным принципом действия таких добавок является увеличение степени гидратации цемента, что не только позволяет в более ранние сроки получить требуемую прочность бетонов, а также увеличить оборачиваемость форм (при производстве железобетонных изделий) или снизить количество цемента в бетонной смеси без потери эксплуатационных характеристик [13,14].

Именно поэтому **целью данной работы** является разработка составов бетонных смесей при использовании различных добавок модификаторов.

## INTRODUCTION

One of the main trends in the cement industry today is the reduction of  $\text{CO}_2$  emissions using more efficient production technologies, the use of alternative fuels, as well as the reduction of clinker content in cement. Research in recent decades has focused on studying various types of mineral components introduced into cement [1-3]. First, this is done to reduce the cost of production, as well as to reduce emissions of so-called greenhouse gas into the atmosphere.

The main raw materials used as mineral additives (MA) are metallurgical slags, fly ash, pozzolans, and microsilica [4-8]. The main mechanism of action of MA is aimed at the interaction of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formed during cement hydration (in cement chemistry it is commonly called portlandite) and  $\text{SiO}_2$  of various modifications, which are the main components of mineral additives. During such chemical reactions, an additional amount of calcium hydrosilicates is formed, which have a higher strength compared to portlandite [9-10]. Metallurgical slags are waste products of the metallurgical industry and, if previously their cost was significantly lower than the cost of clinker, now the price of such materials may be more than half of its cost, which negatively affects the economic component.

It is also customary to use various minerals as mineral additives in cement production [11]. However, since they are components that are not involved in hydration processes, their use is limited: these types of cement cannot be used in critical structures such as airfield surfaces, road and bridge structures, hydraulic structures, as well as in reinforced concrete products (GOST R 55224-2020<sup>1</sup>).

Another indirect way to reduce  $\text{CO}_2$  emissions into the atmosphere is to increase the operational characteristics of concretes (strength) by reducing the water-binding ratio when using high-tech plasticizers or introducing special modifier additives into concrete mixtures that increase the strength characteristics of concrete-based products [12]. The main principle of action of such additives is to increase the degree of cement hydration, which not only allows obtaining the required concrete strength at an earlier date, but also to increase the turnover of molds (in the production of reinforced concrete products) or reduce the amount of cement in the concrete mixture without loss of operational characteristics [13,14].

That is why **the purpose of this work** is to develop compositions of concrete mixtures using various additives of modifiers.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 55224-2020 Цементы для транспортного строительства. Технические условия.: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020-10-13. Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. официальное. Москва: Стандартинформ. 2020. 15с.

GOST R 55224-2020 Cements for road buildings.: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2020-10-13. Federal Agency for Technical Regulation. Official edition. Moscow: Standartinform. 2020. 15p. (Russia)

Материалы и методы исследования

Materials and research methods

В данной работе было использовано 5 различных цементов, отличающихся минералогическим составом: ООО «Хайдебергцемент» ЦЕМ I 52,5 Н «Новогуровский» (далее «Новогуровский»), ООО «Цементум» ЦЕМ II/A-И 42,5 Н «Вольск» (далее «Вольск»), ООО «Цементум» ЦЕМ II/A-И 42,5 Н «Ферзиково» (далее «Ферзиково»), АО «Газметаллпроект» ЦЕМ I 42,5 Н «Пролетарий» (далее «Пролетарий») и АО «Цемрос» ЦЕМ I 42,5 Н «Серебрянский» (далее «Серебрянский») (табл. 1). Также в работе был использован тонкомолотый металлургический шлак производства ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (далее ТМШ). В качестве инертных заполнителей были выбраны песок «Богаевский» и гранитный щебень фракции 5–20 мм «Большой массив».

In this work, 5 different cements were used: Heidelbergcement CEM I 52,5 N Novogurovsky (hereinafter "Novogurovsky"), Cementum CEM II/A-L 42,5 N Volsk (hereinafter "Volsk"), CEM II/A-L 42,5 N Ferzikovo (hereinafter "Ferzikovo"), Gazmetallprojekt CEM I 42,5 N Proletariy (hereinafter "Proletariy") and Cemros CEM I 42,5 N Serebryansky (hereinafter "Serebryansky") (Table 1). Finely ground metallurgical slag produced by Novolipetsk Metallurgical Combine (hereinafter GGBS) was also used in the work. The "Bogaevsky" sand and the "Large massiv" granite crushed stone of the 5-20 mm fraction were chosen as inert aggregates.

ТАБЛИЦА 1 МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТОВ  
Table 1 Mineralogical composition of cements

№	Марка цемента Cement	Минералогический состав, мас. % Mineralogical composition of cement, wt. %			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1	«Пролетарий»	65,3	13,2	5,0	13,4
2	«Новогуровский»	66,0	12,0	7,0	11,0
3	«Вольск»	69,0	10,2	6,1	12,0
4	«Ферзиково»	68,5	8,1	7,5	10,7
5	«Серебрянский»	70,4	5,5	7,6	13,2

В качестве пластификаторов для приготовления бетонных смесей использовали две добавки производства компании Sika: SikaPlast-2089 LF и SikaViscoCrete-3300. Эти две добавки, основой которых являются различные поликарбоксилатные эфиры, нашли свое широкое применение в производстве товарного бетона.

Для изучения влияния химических добавок на эксплуатационные характеристики бетонных смесей и бетонов были выбраны два образца, различающиеся своим химическим составом. Так, образец SE-75 представляет собой комбинацию изопропаноламинов и карбогидратов, а образец SE-25 – комбинация этаноламинов и карбогидратов. Состав данных добавок был разработан авторами Урбановым А. В. и др. ранее [15].

В качестве выходных данных, полученных в ходе изучения влияния добавок модификаторов, выступали следующие параметры: сохраняемость свойств бетонной смеси во времени по ГОСТ 30459-2008<sup>6</sup>, удобоукладываемость, средняя плотность и прочность в возрасте 1, 7 и 28 сут по ГОСТ 10181-2018<sup>7</sup>

Two admixtures manufactured by Sika were used as plasticizers for the preparation of bulk mixtures: SikaPlast-2089 LF and SikaViscoCrete-3300. These two admixtures, based on various polycarboxylate esters, are widely used in the production of ready-mixed concrete.

To study the effect of chemical admixtures on the operational characteristics of concrete mixtures and concrete, two samples were selected that differ in their chemical composition. Thus, the SE-75 sample is a combination of isopropanolamines and carbohydrates, and the SE-25 sample is a combination of ethanolamines and carbohydrates. The composition of these admixtures was developed by the authors Urbanov A.V. and others earlier [15].

The output data obtained during the study of the effect of modifier admixtures were the following parameters: the persistence of the properties of the concrete mixture over time according to GOST 30459-2008<sup>2</sup>, workability, average density and strength over days 1, 7 and 28 according to GOST 10181-2018<sup>3</sup>.

<sup>6</sup> ГОСТ Р 30459-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности.: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2008-12-10. Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. Официальное. Москва: Стандартиформ. 2008. 20с.

GOST R 30459-2008 Admixtures for concrete and mortar. Definition and evaluation of effectiveness.: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2008-12-10. Federal Agency for Technical Regulation. Official edition. Moscow: Standartinform. 2008. 20p. (Russia)

<sup>7</sup> ГОСТ Р 10181-2014.Смеси бетонные. Методы испытаний.: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2014-11-14. Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. Официальное. Москва: Стандартиформ. 2014. 28с.

GOST R 10181-2014 Concrete mix. Measurements methods.: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2014-11-14. Federal Agency for Technical Regulation. Official edition. Moscow: Standartinform. 2014. 28p. (Russia)

## Эксперименты и результаты обсуждения

На первом этапе авторами были проведены исследования по влиянию добавок модификаторов в различных дозировках на свойства бетонных смесей и бетонов, отличающихся цементом («Новогуровский» + ТМШ, «Пролетарий» + ТМШ и «Пролетарий»). Для данных испытаний были выбраны два состава бетонной смеси, различающиеся количеством цемента и ТМШ (табл. 2). Были получены результаты по сохраняемости и плотности бетонной смеси (табл. 3–4).

Для составов со шлаком на цементе «Пролетарий» наблюдается увеличение сохраняемости бетонной смеси (составы 1.1–1.10). Это связано с тем, что в ее состав входят карбогидраты, которые замедляют процессы гидратации цемента, тем самым увеличивая время сохраняемости. Показатели плотности бетонной смеси изменяются в зависимости от дозировки модификаторов.

## Experiments and discussion results

At the first stage, the authors conducted studies on the effect of modifier admixtures in various dosages on the properties of concrete mixtures and concrete that differ in cements (“Novogurovsky” + GGBS, “Proletariy” + GGBS and «Proletariy»). For these tests, two compositions of the concrete mixture were selected, differing in the amount of cement and GGBS (Table 2). Results were obtained on the preservation and density of the concrete mixture (Tables 3-4).

For compositions with slag on “Proletariy” cement, an increase in the retention of the concrete mixture is observed (compositions 1.1-1.10). This is because it contains carbohydrates, which slow down the hydration processes of cement, thereby increasing the shelf life. The density of the concrete mix varies depending on the dosage of the modifiers.

ТАБЛИЦА 2 БАЗОВЫЕ СОСТАВЫ БЕТОННОЙ СМЕСИ НА 1 м<sup>3</sup>  
Table 2 Basic composition of concrete mix per 1 m<sup>3</sup>

Состав Composition	Цемент, кг Cement, kg	ТМШ, кг GGBS, kg	Вода, кг Water, kg	Щебень, кг Gravel, kg	Песок, кг Sand, kg	Пластификатор*, % Plasticizer, %
«Пролетарий»						
1	300	30	180	930	930	1,5
2	330	-	180	930	930	1,5
«Новогуровский»						
3	300	30	180	930	930	1,4

\* SikaPlast-2089 LF. Расчет количества пластификатора проводился от массы цемента. Далее в работе базовые составы будут нумероваться по порядку. Дробная нумерация означает, что брали базовый состав и вводили в него различное количество добавки модификатора, например: состав 1 – базовый состав, состав 1.1 – базовый состав, к которому ввели 0,02% добавки №1 (табл. 3) и т.д.

\* SikaPlast-2089 LF. The amount of plasticizer was calculated based on the weight of cement. Further in the work, the basic compositions will be numbered in order. Fractional numbering means that the base composition was taken and various amounts of the additive of the modifier were introduced into it, for example: composition 1 - base composition, composition 1.1 – base composition, to which 0.02% of additive No. 1 was introduced (Table. 3) etc.

При изучении характеристик бетонных смесей на цементе «Пролетарий» без использования ТМШ видно, что введение в состав модификаторов не влияет на показатели сохраняемости: за два часа бетонная смесь сохраняет свою марку по подвижности. Плотность смеси изученных составов также практически не изменяется при введении добавок и составляют в среднем 2355 кг/м<sup>3</sup> (табл. 3).

Анализируя полученные результаты по влиянию SE-75 и SE-25 на свойства бетонных смесей на основе цемента «Пролетарий» видно, что введение добавок положительно сказывается на сохраняемости бетонной смеси (табл. 4). Так, для составов 3.1–3.5 удается увеличить осадку конуса с П4 до П5 (время сохраняемости 60 мин), при этом, максимальной плотностью 2370 кг/м<sup>3</sup> характеризуется образец, содержащий 0,03 % модификатора SE-75.

Введение добавки SE-25 в меньшей мере влияет на показатели сохраняемости бетонной смеси, но также увеличивает плотность, что и при использовании SE-75.

Получены прочностные характеристики бетонов при использовании двух добавок модификаторов на различных системах вяжущих (рис. 1). Для удобства, данные результаты были интерпретированы в виде процентного прироста прочности относительно базовых составов (без использования модификаторов).

When studying the characteristics of concrete mixes at the “Proletariy” cement without the use of GGBS, the introduction of modifiers into the composition does not affect the retention indicators: in two hours, the concrete mix retains its mobility mark. The density of the mixture of the studied compositions also practically does not change with the introduction of additives and averages 2355 kg/m<sup>3</sup> (Table 3).

Analyzing the results obtained on the effect of SE-75 and SE-25 on the properties of concrete mixtures based on the “Proletariy” cement, the introduction of additives has a positive effect on the preservation of the concrete mixture (Table 4). Thus, for compositions 3.1-3.5, it is possible to increase the cone draft from P4 to P5 (retention time is 60 minutes), at the same time, a sample containing 0,03% of the SE-75 modifier is characterized with a maximum density of 2370 kg/m<sup>3</sup>.

The introduction of the admixture SE-25 has a lesser effect on the retention of the concrete mixture, but also increases the density, as with the use of SE-75.

The strength characteristics of concrete were obtained using two modifiers on different binder systems (Fig. 1). For convenience, these results were interpreted as a percentage increase in strength relative to the base compositions (without the use of modifiers).

**ТАБЛИЦА 3 РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОННОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОБАВОК МОДИФИКАТОРОВ НА ЦЕМЕНТЕ «ПРОЛЕТАРИЙ»**  
**Table 3 Rheological properties of concrete mix using modifiers. Cement “Proletariy”**

Состав Composition	Модификатор, % Modifier, %	Осадка конуса, 5 мин., см Slump, 5 min., sm	Осадка конуса, 120 мин., см Slump, 120 min., sm	Плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup> Density of concrete mix, kg/m <sup>3</sup>
Добавка SE-75 Admixture SE-75				
1	0	19,5	15,5	2316
1.1	0,02	18,5	18,5	2316
1.2	0,03	17	18	2323
1.3	0,05	18	18,5	2330
1.4	0,10	17,5	17	2343
1.5	0,20	17,5	18,5	2327
Добавка SE-25 Admixture SE-25				
1	0	18	14	2324
1.6	0,02	18	18,5	2323
1.7	0,03	19,5	18,5	2333
1.8	0,05	19,5	18	2344
1.9	0,10	19,5	18	2351
1.10	0,20	20	18,5	2342
Добавка SE-75 Admixture SE-75				
2	0	17,5	18	2372
2.1	0,02	18	18,5	2357
2.2	0,03	18,5	18	2360
2.3	0,05	18	18	2370
2.4	0,10	18,5	19	2376
2.5	0,20	19	19	2372
Добавка SE-25 Admixture SE-25				
2	0	18	18	2364
2.6	0,02	16,5	17,5	2340
2.7	0,03	17	17,5	2350
2.8	0,05	16,5	17,5	2360
2.9	0,10	17	17,5	2355
2.10	0,20	16,5	17	2350

**ТАБЛИЦА 4. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОННОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОБАВОК МОДИФИКАТОРОВ НА ЦЕМЕНТЕ «НОВОГУРОВСКИЙ»**  
**Table 4. Rheological properties of concrete mix using modifiers. Cement “Novogurovsky”**

Состав Composition	Модификатор, % Modifier, %	Осадка конуса, 5 мин., см Slump 5 min., sm	Осадка конуса, 60 мин., см Slump, 60 min., sm	Плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup> Density of concrete mix, kg/m <sup>3</sup>
Добавка SE-75 Admixture SE-75				
3	0	22,0	18,0	2350
3.1	0,02	22,5	19,5	2360
3.2	0,03	23,0	20,0	2370
3.3	0,05	23,0	20,0	2365
3.4	0,10	22,5	21,0	2355
3.5	0,20	21,5	21,0	2240
Добавка SE-25 Admixture SE-25				
1	0	23,0	18,0	2350
3.6	0,02	22,0	18,0	2345
3.7	0,03	22,5	18,0	2350
3.8	0,05	23,0	20,0	2365
3.9	0,10	23,0	20,0	2365
3.10	0,20	22,0	20,0	2360

РИСУНОК 1

**ПРОЧНОСТЬ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В ПРИСУТСТВИИ МОДИФИКАТОРОВ**

SE-75 (а, б) и SE-25 (в, г).

П – «Пролетарий»;

Н – «Новогуровский».

Время твердения: 1 сут – а, в; 28 сут – б, г

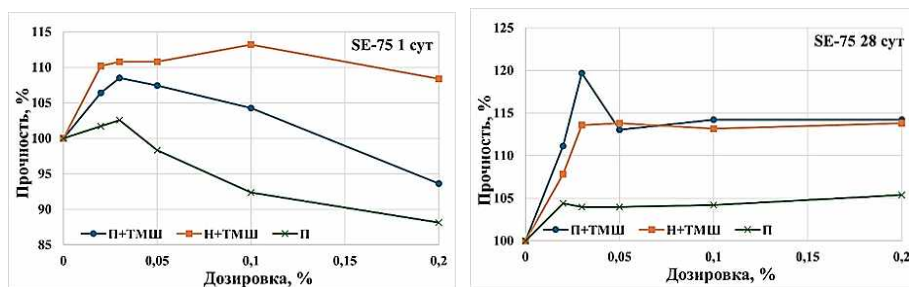


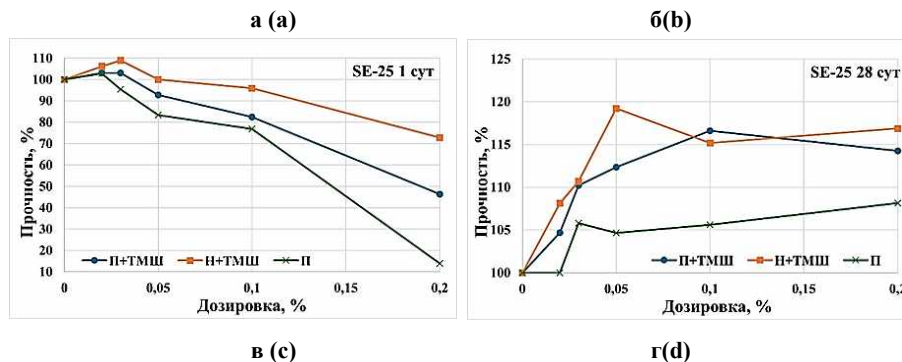
Figure 1

**Strength of concrete using modifiers SE-75 (a, b) и SE-25 (c, d).**

Р – cement “Proletariy”,

N – cement “Novogurovsky”

Hardening time: 1 d – a, c; 28 d – b, d



Полученные результаты показывают, что химические добавки работают схожим образом в бетоне с системой вяжущих «Новогуровский» + ТМШ (рис. 1). Так, на начальных этапах твердения (1 сут) введение SE-75 в диапазоне дозировок 0,02–0,1 % в состав бетонной смеси позволяет увеличить раннюю прочность свыше 10 % (рис. 1а). На прочностные характеристики в возрасте 28 сут модификатор также сказывается положительно: при введении в количестве 0,03–0,1 %  $R_{сж28}$  увеличивается на 14 % (рис. 1б) относительно контрольного состава (без введения добавки).

Схожий вклад в прирост прочности вносит модификатор SE-25 (рис. 1в). Однако, в возрасте 1 сут твердение применение добавки свыше 0,05 % может носить ограниченный характер в связи с эффектом замедления за счет наличия карбогидратов в составе [16].

При смене системы вяжущих в бетонной смеси на «Пролетарий» + ТМШ применение добавок модификаторов носит аналогичный характер, что и в предыдущем случае.

Однако, при применении добавок модификаторов в бетонной смеси только на основе цемента «Пролетарий» их вклад в прочностные характеристики носит не такой явный характер. В ранние сроки твердения введение SE-75 и SE-25 практически не влияет на увеличение прочности. Напротив, при увеличении дозировок добавок прочность резко снижается. Так же, как и в предыдущих случаях, это можно связать с содержанием в составах модификаторов карбогидратов.

В возрасте 28 сут прирост прочности варьируется от 4 до 8 % в зависимости от применяемой дозировки.

Данный эффект можно объяснить следующим образом. Так, применение изопропаноламинов (основной компонент добавки SE-75) в составе цемента со шлаком позволяет получить более плотную микроструктуру, меньшую пористость и более раннее развитие прочности за счет улучшенного распределения и взаимодействия гидратных фаз с минералами шлакового компонента. В смеси без минеральных добавок эффект менее выражен, поскольку базовая система цемента без шлака имеет меньше

The obtained results show that chemical admixtures work in a similar way in concrete with the “Novogurovsky” + GGBS binder system (Fig. 1). Thus, at the initial stages of hardening (1 day), the introduction of SE-75 in the dosage range of 0.02–0.1% into the composition of the concrete mixture makes it possible to increase the early strength over 10% (Fig. 1a). The modifier also has a positive effect on strength characteristics at the age of 28 days: when administered in an amount of 0.03–0.1%,  $R_{сж28}$  increases by 14% (Fig. 1b) relative to the control composition (without the addition of an additive).

The SE-25 modifier makes a similar contribution to the increase in strength (Fig. 1b). However, at the age of 1 day of hardening, the use of an additive over 0.05% may be limited due to the slowing effect due to the presence of carbohydrates in the composition [16].

When changing the binder system in the concrete mix to “Proletariy” + GGBS, the use of admixtures of modifiers is of a similar nature as in the previous case.

However, when using modifier admixtures in a concrete mix based only on “Proletariy” cement, their contribution to strength characteristics is not so obvious. In the early stages of hardening, the introduction of SE-75 and SE-25 has virtually no effect on the increase in strength. On the contrary, when the dosages of admixtures are increased, the strength decreases sharply. As in the previous cases, this can be attributed to the content of carbohydrate modifiers in the formulations.

At the age of 28 days, the strength gain varies from 4 to 8%, depending on the dosage used.

This effect can be explained as follows. Thus, the use of isopropanolamines (the main component of the SE-75 admixture) in cement with slag makes it possible to obtain a denser microstructure, lower porosity, and earlier strength development due to improved distribution and interaction of hydrate phases with the minerals of the slag component. In a mixture without mineral additives, the effect is less pronounced, since the basic cement system without slag has less favorable conditions for adsorption

благоприятных условий для адсорбции и координации гидратных фаз под воздействием алканоламинов. Также в системах со шлаком добавки на основе изопропаноламинов могут стабилизировать силикаты и алюминаты кальция в ранние стадии гидратации, снижая скорость кристаллизации, но при этом формируя более прочную связь между фазами, что в итоге повышает прочность на сжатие по сравнению с портландцементами без минеральных добавок.

В смесях со шлаком энергия, необходимая для перераспределения гидратированных ионов, ниже под влиянием ТЕА (основной компонент добавки SE-25), что позволяет быстрее достигать плотности структуры и требуемой прочности. Без минеральных добавок система имеет меньшие возможности для таких перераспределений, поэтому эффект ТЕА слабее. Введение алканоламинов может снизить размер пор и уменьшить их объём в системе со шлаком за счёт лучшего заполнения межзерновых промежутков и более эффективной кристаллизации, что прямо коррелирует с прочностью. В чистом портландцементе без добавок такие улучшения ограничены из-за отсутствия благоприятных поверхностных и структурных условий. Подробный механизм влияния алканоламинов на гидратацию цемента авторами были изучены ранее [17].

Вторым этапом работы было изучение влияния добавок на прочностные свойства бетонных смесей на основе трех различных цемента («Серебрянский», «Вольск» и «Ферзиково»). Были приготовлены две различные бетонные смеси на основе цемента «Серебрянский» (рис. 2а) и «Серебрянский» + ТМШ (рис. 2б). В первом случае количество цемента составляло 300 кг, что соответствует классу бетона В30. Во втором случае использовали 500 кг цемента и 40 кг ТМШ (класс бетона В60). Попарные бетонные смеси отличались только присутствием добавки модификатора SE-75 в дозировке 0,05 % от массы вяжущих материалов.

Как видно из полученных данных, применение модификатора позволяет увеличить прочность бетона на всех этапах гидратации и твердения, причем наибольший прирост в 15 % характерен для состава бетона класса В30 (рис. 2а).

При сравнении действия добавок модификаторов на цементе «Вольск» (дозировка добавок составила 0,05 %) было отмечено, что наибольший вклад в гидратацию вносит применение добавки SE-75 (рис. 3а), что составляет + 14 % относительно контрольного состава. Также стоит отметить, что введение добавок положительно сказывается на параметрах сохраняемости бетонных смесей: происходит ее увеличение на 30 мин.

При проведении испытаний на цементе «Ферзиково» была выбрана добавка SE-25 (рис. 3б), т. к. данный цемент характеризуется более высоким содержанием  $C_3A$  и меньшим содержанием  $C_4AF$  минералов в составе.

Был взят контрольный образец бетона с содержанием 330 кг цемента, состав, к которому добавили SE-25, а также бетонная смесь, где было снижено количество цемента на 30 кг (10 %) и применен модификатор. Полученные результаты показывают, что добавление SE-25 приводит к увеличению прочности бетона на всех этапах твердения (при одинаковом содержании вяжущего материала в составе) или остается на уровне с контрольным образцом (где количество вяжущего снижено на 10 %).

and coordination of hydrate phases under the influence of alkanolamines.

Also, in systems with slag, admixtures based on isopropanolamines can stabilize calcium silicates and aluminates in the early stages of hydration, reducing the rate of crystallization, but at the same time forming a stronger bond between the phases, which ultimately increases compressive strength compared with Portland cements without mineral additives.

In mixtures with slag, the energy required for the redistribution of hydrated ions is lower under the influence of TEA (the main component of the additive SE-25), which makes it possible to achieve the density of the structure and the required strength faster. Without mineral additives, the system has fewer opportunities for such redistributions, so the TEA effect is weaker. The introduction of alkanolamines can reduce the pore size and reduce their volume in a system with slag due to better filling of the intergranular spaces and more efficient crystallization, which directly correlates with strength. In pure Portland cement without additives, such improvements are limited due to the lack of favorable surface and structural conditions. The detailed mechanism of the effect of alkanolamines on cement hydration was studied earlier by the authors [17].

The second stage of the work was to study the effect of admixtures on the strength properties of concrete mixtures based on three different cements (“Serebryansky”, “Volsk” and “Ferzikovo”). Two different cement-based concrete mixes “Serebryansky” (Fig. 2a) and “Serebryansky” + GGBS (Fig. 2b) were prepared. In the first case, the amount of cement was 300 kg, which corresponds to the concrete class B30. In the second case, 500 kg of cement and 40 kg of GGBS (concrete class B60) were used. The paired concrete mixes differed only in the presence of the SE-75 modifier in a dosage of 0,05% by weight of the binders.

As can be seen from the data obtained, the use of a modifier makes it possible to increase the strength of concrete at all stages of hydration and hardening, with the largest increase of 15% typical for the composition of concrete of class B30 (Fig. 2a).

When comparing the effect of modifier admixtures on «Volsk» cement (the dosage of admixtures was 0,05%), it was noted that the greatest contribution to hydration is made by the use of the additive SE-75 (Fig. 3a), which is + 14 % relative to the control composition. It is also worth noting that the introduction of additives has a positive effect on the retention parameters of concrete mixtures: it increases by 30 minutes.

When testing “Ferzikovo” cement, the admixture SE-25 was selected (Fig. 3b), because this cement is characterized by a higher content of  $C_3A$  and a lower content of  $C_4AF$  minerals in the composition.

A control sample of concrete containing 330 kg of cement was taken, the composition to which SE-25 was added, as well as a concrete mixture, where the amount of cement was reduced by 30 kg (10 %) and a modifier was applied. The results show that the addition of SE-25 leads to an increase in the strength of concrete at all stages of hardening (with the same binder content in the composition) or remains at the same level as the control sample (where the amount of binder is reduced by 10 %).

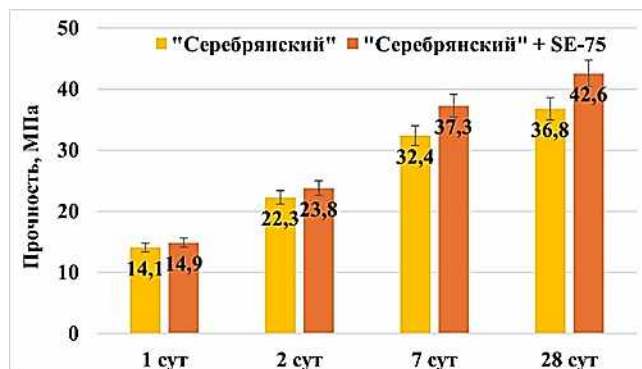
РИСУНОК 2

**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНОВ НА ЦЕМЕНТЕ «СЕРЕБРЯНСКИЙ» В ПРИСУТСТВИИ МОДИФИКАТОРА SE-75:**

а – класс бетона В30;  
б – класс бетона В60

Figure 2

Strength characteristics of concrete on cement “Serebryanskiy” using SE-75 modifier:  
а – В30 class of concrete;  
б – В60 class of concrete



а (а)



б (б)

РИСУНОК 3

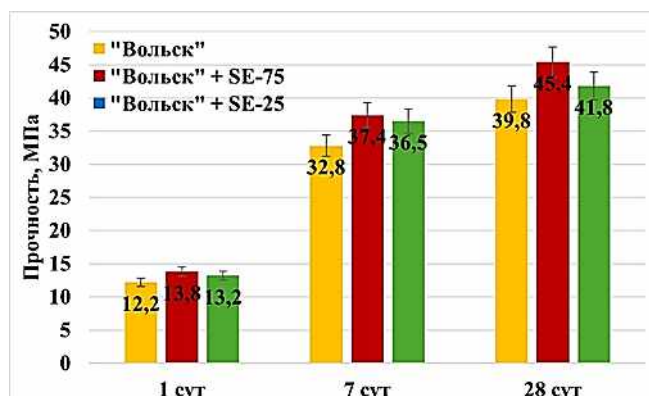
**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНОВ В ПРИСУТСТВИИ МОДИФИКАТОРОВ:**

а – на основе цемента «Вольск»;  
б – на основе цемента «Ферзиково»

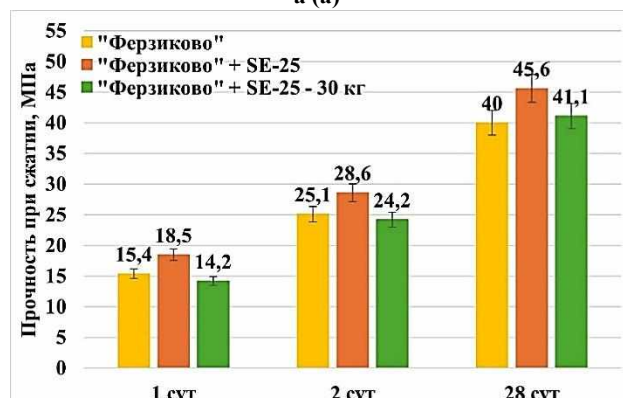
Figure 3

Strength characteristics of concrete mix using modifiers:

а – based on cement “Volsk”;  
б – based on cement “Ferzikovo”



а (а)



б (б)

При условии, что цена 1 т цемента составляет 8500 руб., а стоимость модификатора порядка 350 руб., то при снижении количества вяжущего в составе бетонной смеси

Provided that the price of 1 ton of cement is 8,500 rubles, and the cost of the modifier is about 350 rubles, then if the amount of binder in the concrete mix is reduced

на 10 % экономия при производстве 1 м<sup>3</sup> бетона может составить порядка 200 руб./м<sup>3</sup>, что эквивалентно экономии в 27 млн. руб./год (при производительности завода 120 тыс. м<sup>3</sup> бетона в год).

### Заключение

Изучено влияние двух различных добавок модификаторов на свойства бетонных смесей на основе цементов, отличающихся минералогическим составом. Установлено, что оптимальная дозировка двух добавок составляет 0,03–0,05 % от массы вяжущего. Именно в таком диапазоне наблюдается баланс между эффективностью и экономической составляющей (при решении снижать количество цемента в составе).

Определено, что введение добавок модификаторов в системы, содержащие в своем составе шлаки, позволяет получить больший прирост по прочности по сравнению с клинкерными цементами. Это объясняется созданием уплотненной микроструктурой цементного камня, а также формированием более прочных связей между фазами.

Введение добавок модификаторов позволяет увеличить прочность бетона в возрасте 28 сут на 15–20 % в зависимости от применяемых вяжущих.

С помощью использования добавок модификаторов удалось снизить количество цемента в бетонной смеси класса прочности В30 на 10 %, что при производительности бетонного завода порядка 120 тыс. м<sup>3</sup> в год, эквивалентно 27 млн. руб., что положительно сказывается на экономической составляющей.

### Литература:

1. Z. Yang., Q. Li., M. Liu., N. Xue., L. Xu., K. Wu. Efflorescence inhibition and microstructure evolution of Portland cement-based artificial stone induced by mineral additives // Case studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 17. – e01509. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01509>
2. L. Wei., M. Deng. Investigation of effect of mineral additives on hydration behavior of Portland cement using electrochemical technique // International Journal of Electrochemical Science. – 2022. – Vol. 17. – 221212. <https://doi.org/10.20964/2022.12.15>
3. F. Eren., M. Kestimates., B. Felekoglu., K. Felekoglu. / The role of Pre-Heating and mineral additive modification on Long-Term strength development of calcium aluminate cement mortars // Construction and building materials. – 2022. – Vol. 340. – 127720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127720>
4. H. Qi., X. Yan., X. He., Y. Su., Z. Jin., j. Yang., Y. Li., Q. Luo / Impact of sodium gluconate on the characteristics of cement slurry incorporating PCE and GGBS/wet-ground GGBS // Construction and building materials. – 2025. – Vol. 486. – 142041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142041>
5. J. Xue., S. Li., Z. Zhang., S. Liu., G. Li., X. Guan. Hydration, mechanical properties, and corrosion resistance of ferroaluminate cement in the presence of FA and GGBS // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 102. – 111974. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.111974>
6. Y. Xiang., Y. Li., Y. Chen., J. Deng., S. Li., G. Sun. Synergistic improvement in cement performance via combined use of cationic polymer-grafted nano-silica with silica fume and fly ash // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 112. – 113977. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113977>
7. B.Z. Hailermariam., M.D. Yehualaw., W.Z. Taffese., D.H. Vo. Sustainable utilization of corn husk ash as a pozzolanic cement substitute for mortar production // Construction and Building materials. – 2025. – Vol. 491. – 142723. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142723>

by 10 %, savings in the production of 1 m<sup>3</sup> of concrete can be about 200 rubles/m<sup>3</sup>, which is equivalent to savings of 27 million rubles/year (with a plant capacity of 120 thousand m<sup>3</sup> of concrete per year).

### Conclusion

The effect of two different modifiers on the properties of cement-based concrete mixtures with different mineralogical composition has been studied. It was found that the optimal dosage of the two admixtures is 0,03–0,05% of the binder weight. It is in this range that a balance is observed between efficiency and the economic component (when deciding to reduce the amount of cement in the composition).

It is determined that the introduction of modifier admixtures into systems containing slags allows for a greater increase in strength compared to clinker cements. This is due to the creation of a compacted microstructure of cement stone, as well as the formation of stronger bonds between the phases.

The introduction of modifier admixtures makes it possible to increase the strength of concrete at the age of 28 days by 15–20 %, depending on the binders used.

By using modifier admixtures, it was possible to reduce the amount of cement in the concrete mix of strength class B30 by 10 %, which, with a concrete plant capacity of about 120 thousand m<sup>3</sup> per year, is equivalent to 27 million rubles, which has a positive effect on the economic component.

### References:

1. Z. Yang., Q. Li., M. Liu., N. Xue., L. Xu., K. Wu. Efflorescence inhibition and microstructure evolution of Portland cement-based artificial stone induced by mineral additives // Case studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 17. – e01509. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01509>
2. L. Wei., M. Deng. Investigation of effect of mineral additives on hydration behavior of Portland cement using electrochemical technique // International Journal of Electrochemical Science. – 2022. – Vol. 17. – 221212. <https://doi.org/10.20964/2022.12.15>
3. F. Eren., M. Kestimates., B. Felekoglu., K. Felekoglu. / The role of Pre-Heating and mineral additive modification on Long-Term strength development of calcium aluminate cement mortars // Construction and building materials. – 2022. – Vol. 340. – 127720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127720>
4. H. Qi., X. Yan., X. He., Y. Su., Z. Jin., j. Yang., Y. Li., Q. Luo / Impact of sodium gluconate on the characteristics of cement slurry incorporating PCE and GGBS/wet-ground GGBS // Construction and building materials. – 2025. – Vol. 486. – 142041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142041>
5. J. Xue., S. Li., Z. Zhang., S. Liu., G. Li., X. Guan. Hydration, mechanical properties, and corrosion resistance of ferroaluminate cement in the presence of FA and GGBS // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 102. – 111974. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.111974>
6. Y. Xiang., Y. Li., Y. Chen., J. Deng., S. Li., G. Sun. Synergistic improvement in cement performance via combined use of cationic polymer-grafted nano-silica with silica fume and fly ash // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 112. – 113977. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113977>
7. B.Z. Hailermariam., M.D. Yehualaw., W.Z. Taffese., D.H. Vo. Sustainable utilization of corn husk ash as a pozzolanic cement substitute for mortar production // Construction and Building materials. – 2025. – Vol. 491. – 142723. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142723>

8. X. Yang., Z. Hu., L. Li., X. Wang., X. Zhou. Strength properties, microstructural evolution, and reinforcement mechanism for cement-stabilized loess with silica micro powder // Case studies in construction materials. – 2024. – Vol. 20. – e028848. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02848>
9. K. Kochchapong., P. Wattanachai., S. Chaiwithee., T. Keereemastong., P. Rachtanapun., K. Jantanasakulwong., J. Suhr., C. Sawangrat. Accelerating strength development through pozzolanic activity in hydrated fly-ash cement using plasma-activated water // Journal of materials research and technology. – 2025. – Vol. 36. – P. 5332 - 5340. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.183>
10. T. Wang., T. Ishida., R. Gui., Y. Luan. Experimental investigation of pozzolanic reaction and curing temperature-dependence of low-calcium fly ash in cement system and Ca-Si-Al element distribution of fly ash-blended cement paste // Construction and building material. – 2021. – Vol. 267. – 121012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121012>
11. S. Sim., H. Suh., S. Cho., S. Im., J. Park., J. Liu., S. Bae. Synergistic effects of nano-alumina and triisopropanolamine in Portland limestone cements with various sulfate levels // Cement and Concrete Composites. – 2025. – Vol. 159. – 105994. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105994>
12. S. Barbhuiya., B. B. Das., D. Adak. Effects of chemical admixtures on the properties of concrete // Bindings materials for sustainable construction. – 2025. – P. 329 – 362. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26566-2.00009-X>
13. V. Hallet., T. Hertel., L. Eykens., N. D. Belie., Y. Pontikes. Alkanolamines as grinding aids and hydration enhancers in blended cements with iron-rich non-ferrous metallurgy slag // Construction and building materials. – 2025. – Vol. 470. – 140575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140575>
14. Q. Zhai., K. Kurumisawa., J. Moon., I. H. Hwang. Advances in understanding the effect of alkanolamine in cement-based materials // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 452. – 142167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142167>
15. Урбанов А.В., Потапова Е.Н., Бурвикова Ю.Н. Оптимизация состава бетонной смеси при использовании добавок модификаторов // Бутлеровские сообщения А. – 2025. – Т. 10. – №2. – с. 104 – 112. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/25-82-6-104/ROI-jbc-RA/25-10-2-16>
16. G. Huang., D. Pudasainee., R. Gupta., W. V. Liu. Utilization and performance evaluation of molasses as a retarder and plasticizer for calcium sulfoaluminate cement-based mortar // Construction and building materials. – 2020. – Vol. 243. – 118201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118201>
17. Урбанов А.В., Потапова Е.Н., Бурвикова Ю.Н. Повышение эксплуатационных характеристик цементов при использовании добавок модификаторов // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 74-90. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-20252-74-90>
8. X. Yang., Z. Hu., L. Li., X. Wang., X. Zhou. Strength properties, microstructural evolution, and reinforcement mechanism for cement-stabilized loess with silica micro powder // Case studies in construction materials. – 2024. – Vol. 20. – e028848. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02848>
9. K. Kochchapong., P. Wattanachai., S. Chaiwithee., T. Keereemastong., P. Rachtanapun., K. Jantanasakulwong., J. Suhr., C. Sawangrat. Accelerating strength development through pozzolanic activity in hydrated fly-ash cement using plasma-activated water // Journal of materials research and technology. – 2025. – Vol. 36. – P. 5332 - 5340. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.183>
10. T. Wang., T. Ishida., R. Gui., Y. Luan. Experimental investigation of pozzolanic reaction and curing temperature-dependence of low-calcium fly ash in cement system and Ca-Si-Al element distribution of fly ash-blended cement paste // Construction and building material. – 2021. – Vol. 267. – 121012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121012>
11. S. Sim., H. Suh., S. Cho., S. Im., J. Park., J. Liu., S. Bae. Synergistic effects of nano-alumina and triisopropanolamine in Portland limestone cements with various sulfate levels // Cement and Concrete Composites. – 2025. – Vol. 159. – 105994. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105994>
12. S. Barbhuiya., B. B. Das., D. Adak. Effects of chemical admixtures on the properties of concrete // Bindings materials for sustainable construction. – 2025. – P. 329 – 362. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26566-2.00009-X>
13. V. Hallet., T. Hertel., L. Eykens., N. D. Belie., Y. Pontikes. Alkanolamines as grinding aids and hydration enhancers in blended cements with iron-rich non-ferrous metallurgy slag // Construction and building materials. – 2025. – Vol. 470. – 140575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140575>
14. Q. Zhai., K. Kurumisawa., J. Moon., I. H. Hwang. Advances in understanding the effect of alkanolamine in cement-based materials // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 452. – 142167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142167>
15. Urbanov A.V., Potapova E.N., Burvikova Y.N. Optimization of concrete mix composition using modifier admixtures. Butlerov Communications. 2025. Vol.10. №2. Id.16. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/25-82-6-104/ROI-jbc-RA/25-10-2-16>
16. G. Huang., D. Pudasainee., R. Gupta., W. V. Liu. Utilization and performance evaluation of molasses as a retarder and plasticizer for calcium sulfoaluminate cement-based mortar // Construction and building materials. – 2020. – Vol. 243. – 118201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118201>
17. Urbanov A.V., Potapova E.N., Burvikova Y.N. Improvement of the performance characteristics of cements using modifier additives // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No1. – Pp. 74 – 90. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-20252-74-90>

**Урбанов Андрей Витальевич** – аспирант факультета технологии неорганических веществ и высокотемпературных материалов, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Москва.  
E-mail: [andreiusurb@gmail.com](mailto:andreiusurb@gmail.com); (автор для связи)

**Потапова Екатерина Николаевна** - д.т.н., профессор кафедры химической технологии композиционных и вяжущих материалов, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия, Москва.  
E-mail: [potapova.e.n@muctr.ru](mailto:potapova.e.n@muctr.ru).

**Вклад авторов:** Урбанов А.В. – разработка методик, обработка материала написание статьи; Потапова Е.Н. – научное руководство, научное редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Andrey Vitalievich Urbanov** - Postgraduate student, studying at the Faculty of Technology of Inorganic Substances and High-temperature Materials, D. I. Mendeleev Russian State Technical University, Russia, Moscow.  
E-mail: [andreiusurb@gmail.com](mailto:andreiusurb@gmail.com). (author for contact)

**Ekaterina Nikolaevna Potapova** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Chemical Technology of Composite and Binding Materials, D. I. Mendeleev Russian State Technical University, Moscow, Russia. E-mail: [potapova.e.n@muctr.ru](mailto:potapova.e.n@muctr.ru).

**Contribution of the authors:** Urbanov A.V. – development of methods, processing of material, writing an article; Potapova E.N. – scientific guidance, scientific editing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.00

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN xhsnaa

DOI 10.62980/2076-0655-2026-485-494

## ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА НЕЙТРАЛИЗАЦИЮ ЩЕЛОЧНО- КРЕМНЕЗЕМНОЙ РЕАКЦИИ

Абд Алвахед Фирас<sup>1</sup>, Кривобородов Ю.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

### АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования, направленного на оценку эффективности минеральных добавок в подавлении щелочно-кремнеземной реакции (ЩКР) в бетоне, являющейся одной из основных причин внутренней деградации и снижения долговечности железобетонных конструкций, эксплуатируемых во влажных условиях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных технологических решений, обеспечивающих стабильность микроструктуры цементного камня и увеличение срока службы бетонных сооружений, особенно мостов, гидротехнических и инфраструктурных объектов. При приготовлении бетона использовался песок Халактырский (Камчатский край, Россия), содержащий повышенное количество активного кремнезема, способного вступать в реакцию со щелочами цемента, что указывает на высокую вероятность развития щелочно-кремнеземной реакции (ЩКР) при отсутствии корректирующих добавок. Для снижения интенсивности ЩКР исследовалось влияние двух пуццолановых добавок: микрокремнезема (МКУ-85) и органоминерального модификатора МБ2-50С, представляющего собой композицию микрокремнезема и золы-уноса. Испытания проводились по ускоренной методике, регламентированной ГОСТ 8269.0, с измерением относительных линейных деформаций образцов мелкозернистого бетона, выдерживаемых в щелочной среде при температуре  $(80 \pm 2)$  °С. Результаты показали, что микрокремнезем обладает наибольшим ингибирующим эффектом: при содержании 15 % от массы цемента наблюдалось снижение деформаций ниже предельного уровня (0,1 %) и стабилизация их значений, что позволяет отнести смесь к категории нереакционноспособных. Модификатор МБ2-50С также продемонстрировал способность снижать интенсивность реакции и повышать стабильность поведения бетона во времени, однако его эффективность оказалась ниже по сравнению с микрокремнеземом. При этом увеличение содержания МБ2-50С свыше 15 % может существенно повысить его ингибирующую активность, что делает данную добавку экономически оправданной альтернативой при корректировке дозировки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** щелочно-кремнеземная реакция (ЩКР), микрокремнезем, органоминеральный модификатор, пуццолановые добавки, активный кремнезем, линейные деформации, долговечность бетона.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Абд Алвахед Фирас, Кривобородов Ю.Р. Влияние применения минеральных добавок на нейтрализацию щелочно- кремнеземной реакции // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 485-494. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-485-494>, EDN xhsnaa

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN xhsnaa

DOI 10.62980/2076-0655-2026-485-494

## EFFECT OF MINERAL ADDITIVES ON THE NEUTRALIZATION OF THE ALKALI-SILICA REACTION

Abd Alvahed Firas<sup>1</sup>, Krivoborodov Yu.R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University

### ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental study aimed at evaluating the effectiveness of mineral admixtures in suppressing the alkali-silica reaction (ASR) in concrete, which is one of the main causes of internal deterioration and reduced durability of reinforced concrete structures operated under humid conditions. The relevance of the study is due to the need to develop effective technological solutions that ensure the stability of the cement paste microstructure and extend the service life of concrete structures, particularly bridges, hydraulic engineering facilities, and infrastructure objects. In the preparation of concrete, Khalaktyrsky sand (Kamchatka Krai, Russia) was used as fine aggregate. This sand contains an increased amount of reactive silica capable of reacting with the alkalis of cement, indicating a high probability of alkali-silica reaction (ASR) development in the absence of corrective admixtures. To reduce the intensity of ASR, the influence of two pozzolanic admixtures was investigated: silica fume (MKU-85) and the organomineral modifier MB2-50S, which represents a composition of silica fume and fly ash. The tests were carried out using an accelerated method regulated by GOST 8269.0, involving measurements of the relative linear expansion of fine-grained concrete specimens stored in an alkaline environment at a temperature of  $(80 \pm 2)$  °C. The results showed that silica fume exhibited the strongest inhibiting effect: at a dosage of 15% by mass of cement, the measured expansions decreased below the limiting level (0.1%) and stabilized, allowing the mixture to be classified as non-reactive. The MB2-50S modifier also demonstrated the ability to reduce the reaction intensity and improve the long-term stability of concrete behavior; however, its effectiveness was lower compared with silica fume. At the same time, increasing the content of MB2-50S above 15% may significantly enhance its inhibiting activity, making this admixture an economically justified alternative when adjusting the dosage.

**KEY WORDS:** alkali-silica reaction (ASR), silica fume, organomineral modifier, pozzolanic admixtures, reactive silica, linear expansion, concrete durability.

**FOR CITATION:** Abd Alvahed Firas, Krivoborodov Yu.R. Effect of mineral additives on the neutralization of the alkali-silica reaction // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 485 – 494. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-485-494>, EDN xhsnaa

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее серьёзных проблем, с которыми сталкивается современное производство бетона, является щелочно-кремнезёмная реакция (ЩКР), возникающая при использовании некоторых видов заполнителей. Данный процесс является одним из ключевых факторов внутренней деградации бетона, приводящей к снижению его прочностных характеристик и долговечности [1-5]. ЩКР была зафиксирована во многих странах с различными климатическими условиями, включая регионы с повышенной влажностью и агрессивной средой [6,7]. Опасность данного процесса заключается в том, что он развивается скрытно, а его последствия становятся заметны только через значительный промежуток времени после ввода сооружения в эксплуатацию.

Реакция инициируется взаимодействием щелочей, содержащихся в цементе ( $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ ), с реакционноспособным кремнезёмом, присутствующим в составе заполнителя. В присутствии влаги образуется щелочно-кремнезёмный гель (ASR-gel), который обладает высокой способностью к сорбции воды. В результате этого происходит постепенное набухание геля, что приводит к возникновению внутренних напряжений в цементной матрице. Со временем это вызывает появление сетчатых и картографических трещин, а также снижение прочности и долговечности бетонных конструкций [8-10].

Особенно интенсивно данный процесс протекает во влажных климатических зонах, а также в конструкциях, эксплуатируемых в условиях постоянного увлажнения, например, в мостах, гидротехнических сооружениях, прибрежных платформах, а также на объектах водоподготовки. В таких условиях создаётся оптимальная среда для длительного протекания ЩКР, что приводит к прогрессирующей скрытой деградации материала [11-13].

Так как развитие реакции начинается на микроструктурном уровне, её ранняя диагностика представляет собой значительную сложность. На практике вероятность возникновения ЩКР определяется путём проведения лабораторных испытаний заполнителей до их использования, в том числе с применением стандартных методов, описанных в ASTM C1260<sup>8</sup>, и ГОСТ 8269.0-97<sup>9</sup>, позволяющих оценить потенциальную реакционную способность заполнителя путём измерения линейных деформаций при ускоренных условиях испытаний.

В современных технологиях производства бетона предотвращение ЩКР является важнейшей задачей проектирования долговечных конструкций. Одним из наиболее эффективных способов снижения риска ЩКР считается использование минеральных добавок с пуццолановыми свойствами, способных изменять щелочную среду в порах бетона и снижать доступность кремнезёма для реакции [5, 14-17].

К числу наиболее распространённых пуццолановых материалов, способных снижать интенсивность ЩКР, относятся:

- микрокремнезём;

## INTRODUCTION

One of the most serious problems faced by modern concrete production is the alkali-silica reaction (ASR), which occurs when certain types of aggregates are used. This process is one of the key factors of internal concrete deterioration, leading to a reduction in its strength characteristics and durability [1-5]. ASR has been documented in many countries with different climatic conditions, including regions with high humidity and aggressive environments [6,7]. The danger of this process lies in the fact that it develops covertly, and its consequences become noticeable only after a considerable period of time following the commissioning of a structure.

The reaction is initiated by the interaction of alkalis contained in cement ( $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ ) with reactive silica present in the aggregate. In the presence of moisture, an alkali-silica gel (ASR gel) is formed, which has a high capacity for water absorption. As a result, the gel gradually swells, leading to the development of internal stresses within the cement matrix. Over time, this results in the formation of network and map cracking, as well as a reduction in the strength and durability of concrete structures [8-10].

This process proceeds particularly intensively in humid climatic zones, as well as in structures operated under conditions of constant moisture exposure, such as bridges, hydraulic engineering structures, coastal platforms, and water treatment facilities. Under such conditions, an optimal environment is created for the long-term development of ASR, which leads to progressive hidden degradation of the material [11-13].

Since the development of the reaction begins at the microstructural level, its early diagnosis is a significant challenge. In practice, the probability of ASR occurrence is determined by conducting laboratory tests of aggregates prior to their use, including the application of standard methods described in ASTM C1260<sup>1</sup> and GOST 8269.0-97<sup>2</sup>, which allow the potential reactivity of aggregates to be assessed by measuring linear expansion under accelerated testing conditions.

In modern concrete technology, the prevention of ASR is one of the key tasks in the design of durable structures. One of the most effective ways to reduce the risk of ASR is the use of mineral admixtures with pozzolanic properties, which are capable of modifying the alkaline environment in the pores of concrete and reducing the availability of silica for the reaction [5,14-17].

Among the most common pozzolanic materials capable of reducing the intensity of alkali-silica reaction (ASR) are:

- silica fume;
- metakaolin;
- fly ash;
- granulated blast furnace slag.

These materials exhibit high pozzolanic activity and are capable of binding calcium hydroxide formed during cement hydration, which leads to a reduction in the concentration of free alkalis and a decrease in the alkalinity of the pore solution. As

<sup>8</sup> ASTM C1260 – Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). ASTM International.

<sup>9</sup> ГОСТ 8269.0-97 – Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний

GOST 8269.0-97 – Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical testing

- метакаолин;
- зола-унос;
- гранулированный доменный шлак;

Эти материалы обладают высокой пуццолановой активностью и способны связывать гидроксид кальция, образующийся при гидратации цемента, что приводит к снижению концентрации свободных щелочей и уменьшению щёлочности порового раствора. В результате создаются менее благоприятные условия для протекания щелочно-кремнезёмной реакции. Кроме того, применение таких добавок способствует уплотнению структуры цементного камня и снижению его проницаемости, что ограничивает доступ влаги — важнейшего фактора протекания ЩКР [14–17].

**Целью работы** являлось оценить эффективности применения минеральных добавок в подавлении щелочно-кремнезёмной реакции (ЩКР) в бетоне.

### Материалы и методы

В данном исследовании использовался цемент ЦЕМ I 42,5 Н, произведённый на заводе «Пролетарий» компании «Новоросцемент» в городе Новороссийске. Это портландцемент типа СЕМ I, характеризующийся суммарным содержанием щелочных оксидов  $R_2O$  в клинкере — 0,75 %.

В качестве заполнителя в работе использовался песок пляжа Халактырский, добытый в Камчатском крае. Для оценки его исходных свойств и пригодности к применению в составе бетонных смесей была проведена серия физико-механических испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 8736, направленных на проверку соответствия данного песка нормативным показателям качества заполнителя.

Результаты испытаний:

- насыпная плотность  $\rho_n = 1536$  кг/м<sup>3</sup>;
- содержание пылевидных и глинистых частиц — 0,4 %;
- истинная плотность — 2,75 г/см<sup>3</sup>;
- органические примеси — отсутствуют;
- глина в комках не обнаружена, при нормативе не более 0,25 % по массе (таблица 4 ГОСТ 8736-93<sup>10</sup>).

На основании полученных данных установлено, что песок соответствует требованиям ГОСТ 8736, что позволяет использовать его в качестве заполнителя в бетонных смесях.

Для определения реакционной активности песка были использованы две методики, предусмотренные пунктами 4.22.2 – 4.22.3 ГОСТ 8269.0-97:

- Химический метод — растворение реакционноспособного кремнезёма ( $SiO_2$ ) в растворе гидроксида натрия с последующим определением его массы;
- Ускоренный метод — измерение относительных деформаций образцов мелкозернистого бетона при выдерживании в щелочной среде.

Согласно результатам анализа, содержание растворимого в щелочи диоксида кремния составило 222,8 ммоль/л, что значительно превышает нормативное значение 50 ммоль/л, установленное в приложении А ГОСТ 8736. Это указывает на высокую потенциальную реакционную способность данного заполнителя и вероятность развития ЩКР при его использовании в составе бетона.

as a result, less favorable conditions are created for the development of the alkali–silica reaction. In addition, the use of such admixtures contributes to the densification of the cement paste structure and reduces its permeability, thereby limiting the ingress of moisture—one of the key factors governing ASR development [14–17].

**The aim of this study** was to evaluate the effectiveness of mineral admixtures in suppressing the alkali–silica reaction (ASR) in concrete.

### Materials and Methods

In this study, CEM I 42.5 N cement, produced at the Proletary plant of the Novoroscement company in Novorossiysk, was used. This is a portland cement of type CEM I, characterized by a total alkali oxide content ( $R_2O$ ) in the clinker of 0.75%.

As a fine aggregate, Khalaktyrsky beach sand extracted in the Kamchatka Krai was used. To assess its initial properties and suitability for use in concrete mixtures, a series of physical and mechanical tests was carried out in accordance with the requirements of GOST 8736, aimed at verifying compliance with the standard quality indicators for aggregates.

Test results:

- bulk density  $\rho_n = 1536$  kg/m<sup>3</sup>;
- content of dust and clay particles — 0.4%;
- true density — 2.75 g/cm<sup>3</sup>;
- organic impurities — not detected;
- clay lumps — not detected, with a standard limit of not more than 0.25% by mass (Table 4, GOST 8736-93<sup>3</sup>).

Based on the obtained data, it was established that the sand complies with the requirements of GOST 8736, which allows it to be used as an aggregate in concrete mixtures.

To determine the reactivity of the sand, two methods specified in clauses 4.22.2–4.22.3 of GOST 8269.0-97 were used:

- Chemical method — dissolution of reactive silica ( $SiO_2$ ) in a sodium hydroxide solution followed by determination of its mass;
- Accelerated method — measurement of the relative expansion of fine-grained concrete specimens stored in an alkaline environment.

According to the analysis results, the content of alkali-soluble silicon dioxide was 222.8 mmol/L, which significantly exceeds the regulatory value of 50 mmol/L established in Appendix A of GOST 8736. This indicates a high potential reactivity of the aggregate and a high probability of ASR development when it is used in concrete.

In order to reduce the risk of ASR, additional tests were carried out on concrete mixtures with the use of inhibiting mineral admixtures, including:

<sup>10</sup> ГОСТ 8736-93 Песок для строительных работ. Технические условия.  
GOST 8736-93 Sand for construction work Specifications.

С целью снижения риска ЩКР были проведены дополнительные испытания бетонных смесей с применением ингибирующих минеральных добавок, включая:

- микрокремнезём МКУ-85 – высокоактивная минеральная добавка с выраженными пуццолановыми свойствами [18];

- органо-минеральный модификатор МБ2-50С [19] в соответствии с ГОСТ Р 56178-2014<sup>11</sup> – комплексная добавка на основе микрокремнезёма и золы-уноса, представляющая более экономичную альтернативу чистому микрокремнезёму при сохранении ингибирующих свойств в отношении ЩКР [20].

Изготовление образцов проводилось в соответствии с требованиями п. 4.22.3 ГОСТ 8269.0-97. В таблице 1 представлены составы образцов и основные характеристики мелкозернистого бетона, использованного для ускоренных испытаний.

- silica fume MKU-85 — a highly active mineral admixture with pronounced pozzolanic properties [18];

- organomineral modifier MB2-50S [19], in accordance with GOST R 56178-2014<sup>4</sup> — a complex admixture based on silica fume and fly ash, representing a more economical alternative to pure silica fume while maintaining inhibitory properties with respect to ASR [20].

Specimen preparation was carried out in accordance with the requirements of clause 4.22.3 of GOST 8269.0-97. Table 1 presents the compositions of the specimens and the main characteristics of the fine-grained concrete used for the accelerated tests.

**ТАБЛИЦА 1 СОСТАВЫ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА**  
**Table 1 Composition and main characteristics of fine-grained concrete**

№№ составов Composition No.	Состав бетона Concrete composition					В/Ц W/C	Распływ конуса, Cone spread (106-115мм)
	Цемент Cement	МКУ-85 Microsilica	МБ2-50С Organo-mineral supplement	Песок Sand	Вода Water		
1	400	-	-	900	148	0,37	114
2	380	20	-	900	141	0,37	113
3	360	40	-	900	148	0,41	111
4	340	60	-	900	156	0,46	113
5	380	-	20	900	125	0,33	114
6	360	-	40	900	137	0,38	110
7	340	-	60	900	136	0,4	109

#### Подготовка образцов и проведение ускоренного испытания

После приготовления смесей, представленных в таблице 1, образцы были сформованы и промаркированы с указанием направления «верх – низ». После распалубки образцы помещали в контейнеры с дистиллированной водой таким образом, чтобы уровень воды превышал верхнюю грань образца не менее чем на  $(20 \pm 2)$  мм. Контейнеры герметично закрывали и помещали в термокамеру при температуре  $(80 \pm 2)$  °С на протяжении  $(24 \pm 1)$  ч для проведения предварительной водной обработки.

По завершении этой стадии образцы извлекали, аккуратно удаляли влагу с поверхности влажной салфеткой и измеряли начальную длину при помощи цифрового измерительного прибора с точностью 0,05 мм.

Далее воду в контейнерах заменяли раствором гидроксида натрия концентрации 1 моль/л (приготовленным раствором 40 г NaOH в 900 мл дистиллированной воды с последующим доведением объёма до 1 л), при этом уровень раствора над образцами составлял  $(20 \pm 2)$  мм. После замены раствора контейнеры вновь плотно закрывали и возвращали в климатическую камеру с постоянной температурой  $(80 \pm 2)$  °С.

#### Preparation of Specimens and Accelerated Testing Procedure

After the preparation of the mixtures presented in Table 1, the specimens were molded and labeled with an indication of the «top–bottom» orientation. After demolding, the specimens were placed in containers filled with distilled water so that the water level exceeded the top surface of the specimen by at least  $(20 \pm 2)$  mm. The containers were hermetically sealed and placed in a thermostatic chamber at a temperature of  $(80 \pm 2)$  °C for  $(24 \pm 1)$  h to carry out preliminary water conditioning.

After this stage was completed, the specimens were removed, surface moisture was carefully removed using a damp cloth, and the initial length was measured using a digital measuring device with an accuracy of 0.05 mm.

Subsequently, the water in the containers was replaced with a sodium hydroxide solution with a concentration of 1 mol/L (prepared by dissolving 40 g of NaOH in 900 mL of distilled water followed by dilution to a final volume of 1 L). The solution level above the specimens was maintained at  $(20 \pm 2)$  mm. After replacing the solution, the containers were tightly sealed again and returned to the climatic chamber maintained at a constant temperature of  $(80 \pm 2)$  °C.

<sup>11</sup> ГОСТ Р 56178-2014 Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей.

Затем проводились ежесуточные измерения линейных деформаций образцов с интервалом  $(24 \pm 0,5)$  ч. Испытание продолжалось до получения не менее 11 последовательных измерений в соответствии с порядком и требованиями, установленными ГОСТ 8269.0-97.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались путём построения кривых развития линейных деформаций во времени и расчёта относительного удлинения для каждой исследуемой бетонной смеси. Эти результаты использовались для оценки реакционной активности заполнителя и эффективности минеральных добавок-ингибиторов в снижении интенсивности развития щелочно-кремнезёмной реакции (ЩКР).

В соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 8269.0-97, заполнитель признаётся нереакционноспособным, если относительная линейная деформация образцов, выдержанных в растворе гидроксида натрия, не превышает 0,1 %, а последнее измерение (одиннадцатое) отклоняется не более чем на  $\pm 15$  % от среднего значения трёх предыдущих измерений (восьмого, девятого и десятого).

В случае, если значение деформации превышает 0,1 % или разница между последним показанием и средним значением трёх предыдущих составляет более 15 %, заполнитель относится к категории потенциально реакционноспособных.

В таких случаях допустимость его применения в составе бетона должна быть подтверждена дополнительными долговременными испытаниями образцов бетонной смеси в течение одного года с последующим контролем изменения длины и состояния материала.

После завершения всех этапов измерений были получены результаты, которые отображены на графике, показанном на рисунке 1, где продемонстрировано изменение линейных деформаций во времени для каждого исследуемого состава бетона.

Thereafter, daily measurements of the linear expansion of the specimens were performed at intervals of  $(24 \pm 0.5)$  h. The test continued until at least 11 consecutive measurements were obtained in accordance with the procedure and requirements established by GOST 8269.0-97.

The obtained experimental data were processed by constructing expansion–time curves and calculating the relative expansion for each investigated concrete mixture. These results were used to assess the reactivity of the aggregate and the effectiveness of mineral inhibiting admixtures in reducing the intensity of the alkali–silica reaction (ASR).

In accordance with the requirements of GOST 8269.0-97, an aggregate is considered non-reactive if the relative linear expansion of specimens stored in a sodium hydroxide solution does not exceed 0.1%, and the final measurement (the eleventh) deviates by no more than  $\pm 15\%$  from the average value of the three preceding measurements (the eighth, ninth, and tenth).

If the deformation value exceeds 0.1%, or if the difference between the final measurement and the average of the three preceding values exceeds 15%, the aggregate is classified as potentially reactive.

In such cases, the admissibility of its use in concrete must be confirmed by additional long-term tests of concrete specimens conducted over one year, followed by monitoring of changes in specimen length and the condition of the material.

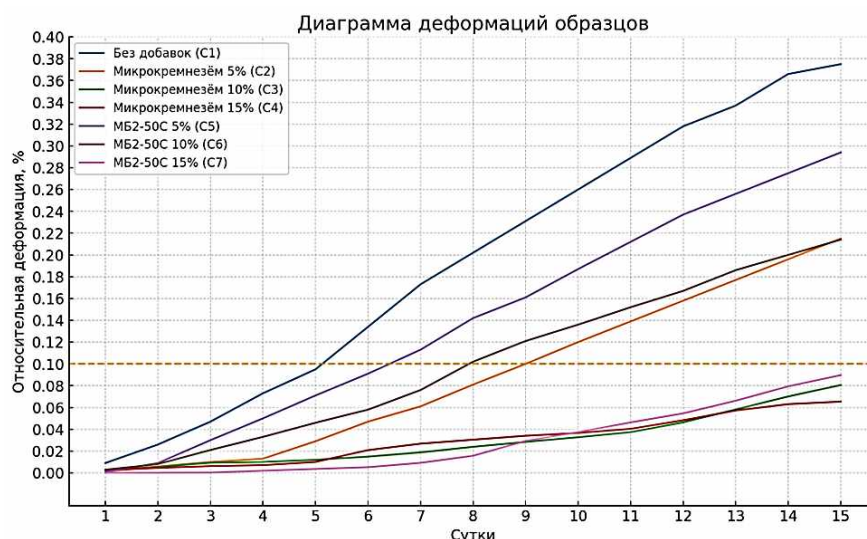
After completing all measurement stages, the results were obtained and are presented in the graph shown in Figure 1, which illustrates the change in linear expansion over time for each investigated concrete composition.

## РИСУНОК 1

### ЗАВИСИМОСТЬ РАЗВИТИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИССЛЕДУЕМЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА

Figure 1

Dependence of the development of linear deformations over time for the studied concrete compositions



Анализ полученных данных по относительным деформациям образцов свидетельствует о заметной вариативности поведения исследованных составов в зависимости от типа применённой добавки и её доли от массы цемента. В контрольном составе, не содержащем каких-либо минеральных

The analysis of the obtained data on the relative expansion of the specimens indicates significant variability in the behavior of the investigated compositions depending on the type of admixture used and its proportion relative to the mass of cement. In the control mixture, which did

или органоминеральных модификаторов, конечная деформация (КД) достигла 0,375 %, при среднем значении (СД) за 12–14-е сутки на уровне 0,340 % и относительном расхождении в 9,2 %. Несмотря на удовлетворительную стабильность показателей на заключительном этапе, сам уровень деформации существенно превышает нормативный предел, что указывает на выраженную склонность заполнителя к щелочно-кремнезёмной реакции. Такой состав следует признать реакционноспособным.

Во втором составе, содержащем микрокремнезём в количестве 5 % от массы цемента, конечная деформация снизилась до 0,215 %, однако среднее значение за 12–14-е сутки составило 0,177 %, а относительное расхождение достигло 17,7 %, что превышает допустимую величину. Несмотря на некоторое снижение уровня деформаций, показатели остаются выше нормативного предела, а нестабильность в конце наблюдений подтверждает сохраняющуюся активность химического взаимодействия. Следовательно, данный состав также относится к реакционноспособным.

В третьем составе, модифицированном микрокремнезёмом в количестве 10 %, конечное значение деформации составило 0,0806 %, что укладывается в нормативный предел. Однако среднее значение за 12–14-е сутки (0,0582 %) и высокий уровень относительного расхождения (27,8 %) указывают на отсутствие стабилизации процесса на поздней стадии испытаний. Несмотря на снижение интенсивности реакций, развитие деформаций продолжается, что позволяет классифицировать данный состав как потенциально реакционноспособный.

Наиболее благоприятный результат продемонстрирован четвёртым составом, содержащим 15 % микрокремнезёма. Конечная деформация составила 0,0654 %, среднее значение — 0,0562 %, а относительное расхождение — 14,1 %, что находится в пределах допустимых значений. Достигнутая стабильность показателей и низкий уровень деформаций свидетельствуют об эффективном снижении концентрации свободных щелочей и о формировании более плотной структуры цементного камня. Этот состав можно отнести к категории неактивных по отношению к щелочам.

Гистограмма конечных деформаций и их средних значений за 12–14-е сутки образцов выдержанных в растворе гидроксида натрия в зависимости от микрокремнезёма и его доли от массы цемента представлены на рис. 2. Уровень деформации и его нормативный предел для образцов содержащих микрокремнезём представлен на рис. 3.

Таким образом, увеличивая в составе мелкозернистого бетона содержание микрокремнезёма до 15 % можно добиться снижения реакционной способности цементного камня.

В пятом составе, содержащем органоминеральный модификатор МБ2-50С в количестве 5 %, конечная деформация достигла 0,294 %, при среднем значении 0,256 % и относительном расхождении 12,9 %. Несмотря на удовлетворительную стабильность заключительных измерений, уровень деформаций остаётся значительно выше нормативного, что указывает на недостаточную эффективность добавки при таком содержании, т.е. состав является реакционноспособным.

В шестом составе количество МБ2-50С увеличено до 10 %, что привело к частичному снижению деформаций, однако конечное значение 0,214 % и среднее за 12–14-е сутки 0,184 %, при относительном расхождении 14 %, по-прежнему свидетельствуют о превышении нормативного

not contain any mineral or organomineral modifiers, the final expansion (FE) reached 0.375%, with an average value (AE) for days 12–14 of 0.340% and a relative deviation of 9.2%. Despite the satisfactory stability of the results at the final stage, the deformation level itself significantly exceeds the regulatory limit, indicating a pronounced tendency of the aggregate toward alkali–silica reaction (ASR). Such a mixture should therefore be classified as reactive.

In the second mixture, containing 5% silica fume by mass of cement, the final expansion decreased to 0.215%. However, the average value for days 12–14 was 0.177%, and the relative deviation reached 17.7%, which exceeds the permissible limit. Although a certain reduction in expansion was observed, the values remain above the regulatory threshold, and the instability at the end of the observation period confirms the continuing activity of chemical interaction. Consequently, this mixture should also be classified as reactive.

In the third mixture, modified with 10% silica fume, the final expansion value was 0.0806%, which falls within the regulatory limit. However, the average value for days 12–14 (0.0582%) and the high level of relative deviation (27.8%) indicate a lack of stabilization of the process at the late stage of testing. Despite the reduced intensity of the reactions, the development of expansion continues, which allows this mixture to be classified as potentially reactive.

The most favorable result was demonstrated by the fourth mixture, containing 15% silica fume. The final expansion was 0.0654%, the average value was 0.0562%, and the relative deviation was 14.1%, which is within the permissible limits. The achieved stability of the indicators and the low level of expansion indicate an effective reduction in the concentration of free alkalis and the formation of a denser cement paste structure. This mixture can therefore be classified as non-reactive with respect to alkalis.

A histogram of the final expansions and their average values for days 12–14 of specimens stored in a sodium hydroxide solution, depending on the silica fume content and its proportion relative to the mass of cement, is presented in Figure 2. The expansion level and its regulatory limit for specimens containing silica fume are shown in Figure 3.

Thus, increasing the silica fume content in fine-grained concrete to 15% makes it possible to reduce the reactivity of the cement paste.

In the fifth mixture, containing the organomineral modifier MB2-50S in an amount of 5%, the final expansion reached 0.294%, with an average value of 0.256% and a relative deviation of 12.9%. Despite the satisfactory stability of the final measurements, the expansion level remains significantly above the regulatory limit, indicating insufficient effectiveness of the admixture at this dosage; therefore, this mixture is classified as reactive.

In the sixth mixture, the content of MB2-50S was increased to 10%, which led to a partial reduction in expansion. However, the final expansion value of 0.214% and the average value for days 12–14 of 0.184%, with a relative deviation of 14%, still indicate that the regulatory limit is exceeded. This demonstrates the limited ability of

предела. Это указывает на ограниченную способность добавки подавлять развитие щёлочно-кремнезёмной реакции, и данный состав также следует считать реакционноспособным.

the admixture to suppress the development of the alkali-silica reaction, and therefore this mixture should also be considered reactive.

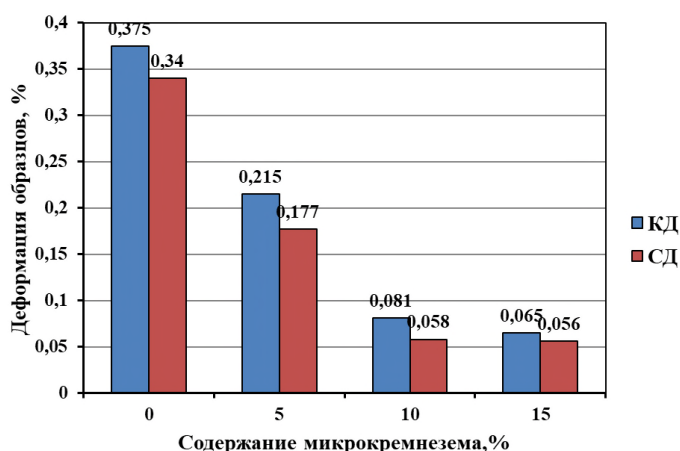
## РИСУНОК 2

### ГИСТОГРАММА КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ИХ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВ С МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ

КД – конечная деформация  
СД – среднее значение деформация за 12–14-е сутки

Figure 2

Histogram of final deformations and their average values for samples with microsilica  
KD – final deformation  
SD – average deformation value for the 12th–14th day

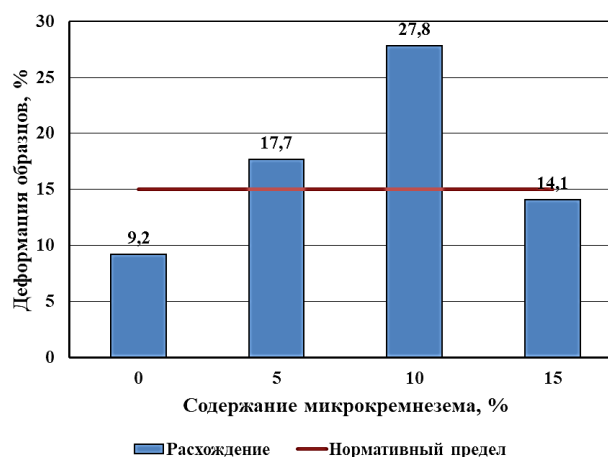


## РИСУНОК 3

### УРОВЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ И ЕГО НОРМАТИВНЫЙ ПРЕДЕЛ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ СОДЕРЖАЩИХ МИКРОКРЕМНЕЗЕМ

Figure 3

The level of deformation and its standard limit for samples containing microsilica



В седьмом составе, содержащем 15 % МБ2-50С, конечная деформация уменьшилась до 0,0897 %, что формально соответствует нормативному ограничению. Однако среднее значение за 12–14-е сутки составило 0,0667 %, а относительное расхождение достигло 25,6 %, что является свидетельством нестабильности процесса на завершающем этапе. Несмотря на снижение общего уровня деформаций, сохранение значительного прироста в конце испытания указывает на продолжающееся развитие реакционных процессов. Такой состав следует классифицировать как потенциально реакционноспособный.

Гистограмма конечных деформаций и их средних значений за 12–14-е сутки образцов выдержанных в растворе гидроксида натрия в зависимости от содержания органоминерального модификатора МБ2-50С представлены на рис. 4. Уровень деформации и его нормативный предел для образцов содержащих МБ2-50С представлен на рис. 5.

## Выводы

Проведённые исследования показали, что увеличение содержания микрокремнезёма — особенно до уровня 15 % — является наиболее эффективным способом подавления щёлочно-кремнезёмной реакции и предотвращения связанных с ней деформаций. В данном случае были

In the seventh mixture, containing 15% MB2-50S, the final expansion decreased to 0.0897%, which formally complies with the regulatory limit. However, the average value for days 12–14 was 0.0667%, and the relative deviation reached 25.6%, indicating instability of the process at the final stage. Despite the overall reduction in expansion, the continued significant increase at the end of the test indicates that reaction processes are still developing. Therefore, this mixture should be classified as potentially reactive.

A histogram of the final expansions and their average values for days 12–14 of specimens stored in a sodium hydroxide solution, depending on the content of the organomineral modifier MB2-50S, is presented in Figure 4. The expansion level and its regulatory limit for specimens containing MB2-50S are shown in Figure 5.

## Conclusions

The conducted study demonstrated that increasing the silica fume content, particularly up to 15%, is the most effective way to suppress the alkali-silica reaction (ASR) and prevent the associated expansions. In this case, the requirements of GOST 8269.0-97 were fully satisfied both in terms

полностью выполнены требования ГОСТ 8269.0-97 как по величине конечной деформации, так и по стабильности её значений на заключительных стадиях испытаний. Указанный эффект обусловлен высокой пуццолановой активностью микрокремнезёма, его способностью связывать гидроксид кальция и модифицировать микроструктуру цементного камня, что приводит к снижению концентрации свободных щелочей и ограничению образования расширяющегося щёлочно-кремнезёмного геля.

of the final expansion value and the stability of the measurements at the final stages of testing. This effect is attributed to the high pozzolanic activity of silica fume, its ability to bind calcium hydroxide, and to modify the microstructure of the cement paste, which results in a reduction in the concentration of free alkalis and limits the formation of expansive alkali-silica gel.

#### РИСУНОК 4

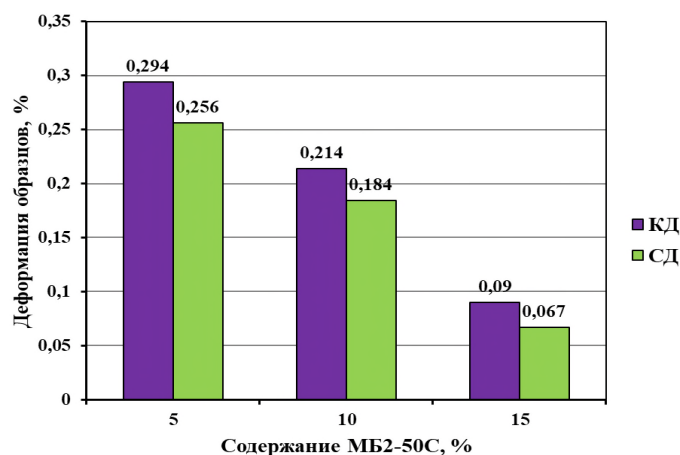
##### ГИСТОГРАММА КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ИХ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВ С МВ2-50С

КД – конечная деформация  
СД – среднее значение деформация за 12–14-е сутки

Figure 4

Histogram of final deformations and their average values for samples with MB2-50C

KD – final deformation  
SD – average deformation value for the 12th–14th day

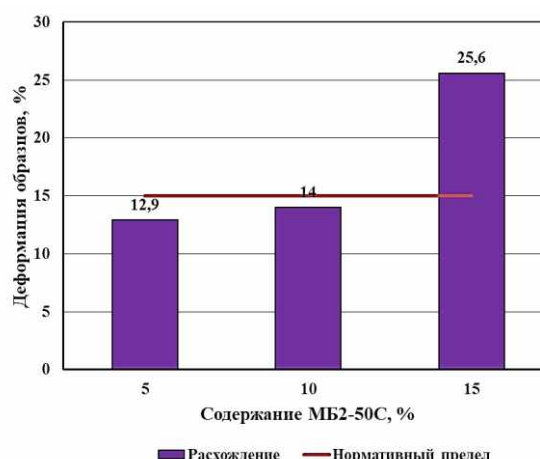


#### РИСУНОК 5

##### УРОВЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ И ЕГО НОРМАТИВНЫЙ ПРЕДЕЛ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ СОДЕРЖАЩИХ МВ2-50С

Figure 5

The level of deformation and its standard limit for samples containing MB2-50C



Несмотря на высокую техническую эффективность данного подхода, его применение связано со значительными экономическими затратами. Микрокремнезём относится к материалам с относительно высокой стоимостью, что делает его использование в больших количествах экономически нецелесообразным при реализации крупномасштабных строительных проектов — таких, как мостовые сооружения, гидротехнические объекты и инфраструктурные комплексы.

Despite the high technical efficiency of this approach, its application is associated with considerable economic costs. Silica fume is a relatively expensive material, which makes its use in large quantities economically impractical for large-scale construction projects such as bridges, hydraulic engineering structures, and infrastructure complexes.

Результаты применения модификатора МВ2-50С показывают, что увеличение его дозировки в составе бетонной смеси способствует постепенному и закономерному повышению стойкости бетона к щёлочно-кремнезёмной реакции. С ростом содержания модификатора наблюдается уменьшение деформаций и повышение стабильности их развития во времени, что указывает на способность МВ2-50С регулировать щелочной режим порового пространства и снижать интенсивность протекания реакции. Несмотря на то, что отдельные составы не достигли уровня полного ингибирования щелочно-кремнезёмной реакции в соответствии с требованиями стандарта,

The results obtained for the MB2-50S modifier show that increasing its dosage in the concrete mixture leads to a gradual and consistent improvement in the resistance of concrete to the alkali-silica reaction. As the modifier content increases, a reduction in expansion and greater stability of their development over time are observed, indicating the ability of MB2-50S to regulate the alkaline conditions of the pore solution and reduce the intensity of the reaction. Although some mixtures did not achieve the level of complete inhibition of ASR in accordance with the standard requirements, the overall trend of the results indicates

общая тенденция результатов свидетельствует о том, что увеличение доли модификатора позволяет снизить воздействие реакции до практически приемлемых значений при сохранении экономической целесообразности.

Таким образом, микрокремнезём следует рассматривать как наиболее эффективный ингибитор щелочно-кремнезёмной реакции с точки зрения технического эффекта, однако его широкое применение ограничивается экономическими факторами. Повышение содержания модификатора МБ2-50С обеспечивает более сбалансированное решение, сочетающее удовлетворительный уровень подавления реакции с оптимальными затратами, что делает данный подход практически оправданным для инженерных применений, особенно в проектах крупного масштаба, где требуется обеспечить надёжность эксплуатации при сохранении экономической эффективности.

### Литература:

1. Брыков, А. С. Щелоче-кремнеземные реакции, щелочная коррозия портландцементных бетонов и пуццолановые добавки - ингибиторы коррозии / А. С. Брыков, М. Е. Воронков // Цемент и его применение. – 2014. – № 5. – С. 87-94. – EDN TIREAB.
2. Розенталь, Н. К. Способы защиты бетона от щелочной коррозии / Н. К. Розенталь, Г. В. Любарская, А. Н. Розенталь // Бетон и железобетон. – 2015. – № 1. – С. 24-27. – EDN WHTAVF.
3. Розенталь, Н. К. Реакционноспособные со щелочами заполнители: коррозия и защита бетона / Н. К. Розенталь, Г. В. Чехний, А. Н. Розенталь // Вестник НИЦ Строительство. – 2024. – № 4(43). – С. 141-155. – [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-141-155](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-141-155). – EDN OBMIJU.
4. Влияние минеральных добавок на развитие щелочной коррозии в портландцементных бетонах с реакционноспособным гравийным заполнителем / Я. Жвиронайте, Ю. Малайшкене, Й. Пранцкявичене [и др.] // Цемент и его применение. – 2020. – № 2. – С. 64-69. – EDN FKPGMY.
5. Портландцемент, содержащий золу-унос для предотвращения щелочной коррозии бетона / Г. С. Рояк, И. В. Грановская, Н. В. Стржалковская, Д. А. Миленин // Цемент и его применение. – 2015. – № 1. – С. 89-92. – EDN TSNQDF.
6. Хироно С., Ямада К., Андо Й., Тории К. Проблемы, связанные с щелоче-кремнеземной реакцией, в Японии и Таиланде // Цемент и его применение. – 2016. – № 3. – С. 88-94.
7. Льюис Р.С., Байрак Э. Применение микрокремнезема для профилактики щелоче-кремнеземной реакции с целью обеспечить использование местных заполнителей в Турции // Цемент и его применение. – 2016. – № 4. – С. 108-111.
8. Курдовски В. Значение щелочей в цементе для технологии бетона // Цемент и его применение. 2015. №1. С. 89-92.
9. Рояк, Г. С. Продукты реакции при развитии щелочной коррозии бетона и меры ее предотвращения / Г. С. Рояк, И. В. Грановская // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2014. – № 1(33). – С. 58-67. – EDN RYWPPV.
10. Добшиц, Л. М. Требования к качеству используемых материалов для изготовления долговечных железобетонных изделий и конструкций / Л. М. Добшиц, А. А. Николаева // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2023. – № 2(71). – С. 38-45. – EDN CHYWPD.
11. Королев, Е. В. Оценка условий протекания щелочной коррозии. Исследование объёмного распределения воды в материале / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, С. Ли // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 5-18. – [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2024\\_3\\_5](https://doi.org/10.54734/20722958_2024_3_5). – EDN EPNHWD.
12. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Модель процесса / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, А. В. Михеев, В. А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 4(81). – С. 134-143. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-134-143>. – EDN ABJKUI.
13. Влажностные деформации бетона, подверженного

that increasing the proportion of the modifier makes it possible to reduce the impact of the reaction to practically acceptable levels while maintaining economic feasibility.

Thus, silica fume should be considered the most effective ASR inhibitor from a technical perspective; however, its widespread use is limited by economic factors. Increasing the content of the MB2-50S modifier provides a more balanced solution that combines a satisfactory level of reaction suppression with optimized costs. This makes the approach practically justified for engineering applications, especially in large-scale projects where operational reliability must be ensured while maintaining economic efficiency.

### References

1. Brykov, A. S. Schelochekremnezemnyye reakcii, shelochnaya korrozziya portlandcementnyh betonov i puccolanovyie dobavki - ingibitory korrozii / A. S. Brykov, M. E. Voronkov // Cement i ego primenenie. – 2014. – № 5. – S. 87-94. – EDN TIREAB.
2. Rozental', N. K. Sposoby zaschity betona ot shelochnoy korrozii / N. K. Rozental', G. V. Lyubarskaya, A. N. Rozental' // Beton i zhelezobeton. – 2015. – № 1. – S. 24-27. – EDN WHTAVF.
3. Rozental', N. K. Reakcionnosposobnyye so shelochami zapolnители: korrozziya i zaschita betona / N. K. Rozental', G. V. Chehniy, A. N. Rozental' // Vestnik NIC Stroitel'stvo. – 2024. – № 4(43). – S. 141-155. – [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-141-155](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-141-155). – EDN OBMIJU.
4. Vliyanie mineral'nyh dobavok na razvitiye shelochnoy korrozii v portlandcementnyh betonah s reakcionnosposobnym graviynym zapolnitelem / Ya. Zhvironayte, Yu. Malayshkene, Y. Pranc'kyavichene [i dr.] // Cement i ego primenenie. – 2020. – № 2. – S. 64-69. – EDN FKPGMY.
5. Portlandcement, soderzhaschii zolu-unos dlya predotvrashcheniya shelochnoy korrozii betona / G. S. Royak, I. V. Granovskaya, N. V. Strzhalkovskaya, D. A. Milenin // Cement i ego primenenie. – 2015. – № 1. – S. 89-92. – EDN TSNQDF.
6. Hirono S., Yamada K., Ando Y., Torii K. Problemy, svyazannye s shelochekremnezemnoy reakciey, v Yaponii i Tailande // Cement i ego primenenie. – 2016. – № 3. – S. 88-94.
7. L'yuis R.S., Bayrak E. Primenenie mikroremnezema dlya profilaktiki shelochekremnezemnoy reakcii s cel'yu obespechit' ispol'zovanie mestnyh zapolniteley v Turcii // Cement i ego primenenie. – 2016. – № 4. – S. 108-111.
8. Kurdovski V. Znachenie shelochey v cemente dlya tehnologii betona // Cement i ego primenenie. 2015. №1. S. 89-92.
9. Royak, G. S. Produkty reakcii pri razvitiy shelochnoy korrozii betona i mery ee predotvrashcheniya / G. S. Royak, I. V. Granovskaya // ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi. – 2014. – № 1(33). – S. 58-67. – EDN RYWPPV.
10. Dobshic, L. M. Trebovaniya k kachestvu ispol'zuemyh materialov dlya izgotovleniya dolgovechnykh zhelezobetonnyh izdeliy i konstrukcij / L. M. Dobshic, A. A. Nikolaeva // ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi. – 2023. – № 2(71). – S. 38-45. – EDN CHYWPD.
11. Korolev, E. V. Ocenka usloviy prottekaniya shelochnoy korrozii. Issledovanie ob'emnogo raspredeleniya vody v materiale / E. V. Korolev, A. N. Grishina, S. Li // Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo. – 2024. – № 3(60). – S. 5-18. – [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2024\\_3\\_5](https://doi.org/10.54734/20722958_2024_3_5). – EDN EPNHWD.
12. Vlazhnostnyye deformacii betona, podverzhenogo shelochnoy korrozii. Model' processa / E. V. Korolev, A. N. Grishina, A. V. Miheev, V. A. Gladkih // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2020. – № 4(81). – S. 134-143. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-134-143>. – EDN ABJKUI.

- щелочной коррозии. Экспериментальные результаты / А. Н. Гришина, Е. В. Королев, А. В. Михеев, В. А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6(83). – С. 140-148. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-140-148>. – EDN EYXXWI.
14. Эффективные способы предотвращения коррозии гидротехнического бетона / А. Шарифов, З. Х. Гайбуллаева, Д. С. Ньматзода, З. А. Гозиев // Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2022. – Т. 65, № 1-2. – С. 98-105. – EDN WDELEG.
15. Добшиц, Л. М. Влияние примесей в компонентах бетона на протекание щелочно-кремнеземной реакции в железобетонных конструкциях / Л. М. Добшиц, А. А. Николаева // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2023. – № 1(15). – С. 38-42. – EDN WDQZDC.
16. Исследование физико-механических свойств бетона с добавлением многофункциональной добавки / А. Н. Перевощикова, И. В. Вальцифер, Н. Б. Кондрашова, Н. С. Воронина // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 170-179. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179>. – EDN BFTEZA.
17. Сорвачева, Ю. А. Влияние нано-кремнезема на кинетику протекания щелочной коррозии бетона / Ю. А. Сорвачева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 2(39). – С. 118-123. – EDN SGRTTZ.
18. Кахаров З.В., Исломов А.С. Применение микрокремнезема при производстве бетонной смеси // Вестник науки. – 2023. – № 4(61). – С. 371-377.
19. Гувалов А.А., Аббасова С.И., Кузнецова Т.В. Улучшение структуры высокопрочного бетона с применением модификаторов // Строительные материалы. 2015. № 12. С. 78-80. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-732-12-78-80>
20. Модификаторы бетона МБ-С // Официальный сайт «Мастер-Бетон-МБ». – Электронный ресурс. – Режим доступа: masterbeton-mb.ru (дата обращения: 16.11.2025).
13. Vlazhnostnyye deformatsii betona, podverzhennogo shchelochnoy korrozii. Eksperimental'nye rezul'taty / A. N. Grishina, E. V. Korolev, A. V. Miheev, V. A. Gladkih // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2020. – № 6(83). – S. 140-148. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-140-148>. – EDN EYXXWI.
14. Effektivnyye sposoby predotvrashcheniya korrozii gidrotekhnicheskogo betona / A. Sharifov, Z. H. Gaybullaeva, D. S. Ne'matzoda, Z. A. Goziev // Doklady Nacional'noy akademii nauk Tadjhikistana. – 2022. – T. 65, № 1-2. – S. 98-105. – EDN WDELEG.
15. Dobshic, L. M. Vliyanie primesey v komponentah betona na protokanie shchelochno-kremnezemnoy reakcii v zhelezobetonnykh konstrukciyah / L. M. Dobshic, A. A. Nikolaeva // Resursoenergoeffektivnyye tehnologii v stroitel'nom komplekse regiona. – 2023. – № 1(15). – S. 38-42. – EDN WDQZDC.
16. Issledovanie fiziko-mehaniicheskikh svoystv betona s dobavleniem mnogofunktsional'noy dobavki / A. N. Perevoschikova, I. V. Val'cifer, N. B. Kondrashova, N. S. Voronina // Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal. – 2024. – T. 16, № 2. – S. 170-179. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179>. – EDN BFTEZA.
17. Sorvacheva, Yu. A. Vliyanie nano-kremnezema na kinetiku protokaniya shchelochnoy korrozii betona / Yu. A. Sorvacheva // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobscheniya. – 2014. – № 2(39). – S. 118-123. – EDN SGRTTZ.
18. Kaharov Z.V., Islomov A.S. Primeneniye mikrokremsnezema pri proizvodstve betonnoy smesi // Vestnik nauki. – 2023. – № 4(61). – S. 371-377.
19. Guvalov A.A., Abbasova S.I., Kuznecova T.V. Uluchsheniye struktury vysokoprochnogo betona s primeneniem modifikatorov // Stroitel'nye materialy. 2015. № 12. S. 78-80. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-732-12-78-80>
20. Modifikatory betona MB-S // Oficial'nyy sayt «MasterBeton-MB». – Elektronnyy resurs. – Rezhim dostupa: masterbeton-mb.ru (data obrascheniya: 16.11.2025).

*Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030».*  
*Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».*

*The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”.*  
*Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”*

**Фирас Абд Алвахед** – аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [firmas.abd.alwahed@yandex.ru](mailto:firmas.abd.alwahed@yandex.ru) (автор для связи)

**Кривобородов Юрий Романович** – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru)

**Вклад авторов:** Абд Алвахед Фирас – выполнение исследований, обработка результатов, написание статьи, Кривобородов Ю.Р. – научное руководство, редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Firas Abd Alwahed** – postgraduate student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
E-mail: [firmas.abd.alwahed@yandex.ru](mailto:firmas.abd.alwahed@yandex.ru) (author for contact)

**Krivoborodov Yuri Romanovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: [ykriv@rambler.ru](mailto:ykriv@rambler.ru)

**Contribution of the author:** Abd Alwahed Firas – research, processing results, writing the article, Krivoborodov Yu.R. – scientific supervision, editing the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.



ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СИЛИКАТОВ  
ENGINEERING AND TECHNOLOGY OF SILICATES

Научно-технический журнал  
по вяжущим, керамике, стеклу и эмалям  
Том 32, № 5 (специальный выпуск)

Science and technology journal of binders, ceramics, glass and enamels  
Volume 32, No5 (special edition)

Издатель ИП Самченко С.В.

Редактор и корректор С.В. Самченко  
Верстка С.Ю. Кривобородова  
Перевод С.Ю. Кривобородова

---

Подп. к печати 25.12.2025. Печ. л. 10,23. Усл. печ. л. 9,52. Формат 60x84/8

Печать офсетная. Заказ 25.

Отпечатано в типографии НИУ МГСУ  
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, корп. 8.

---