

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный технический университет»  
(ТвГТУ)

**ИННОВАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ  
И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ**

*Материалы V Международной  
научно-технической конференции  
(18 февраля 2021 г., Тверь)*

Тверь 2021

УДК 378.1:[33+31+62+69+004+502+54]  
ББК 74.48

Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве: материалы V Международной научно-технической конференции (18 февраля 2021 г., Тверь) / под ред. В.В. Белова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. 180 с.

Включены научные труды, посвященные возможностям математического моделирования, прогнозирования свойств и проведения автоматизированных расчетов, которые определяют сегодняшние инновационные подходы и методологию развития строительных технологий и процессов подготовки специалистов, работающих в данной сфере.

Предназначены для научных и инженерно-технических работников, научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, а также докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов вузов строительного профиля.

Авторы предоставленных к опубликованию докладов несут ответственность за достоверность приведенных в них сведений.

## Уважаемые коллеги!

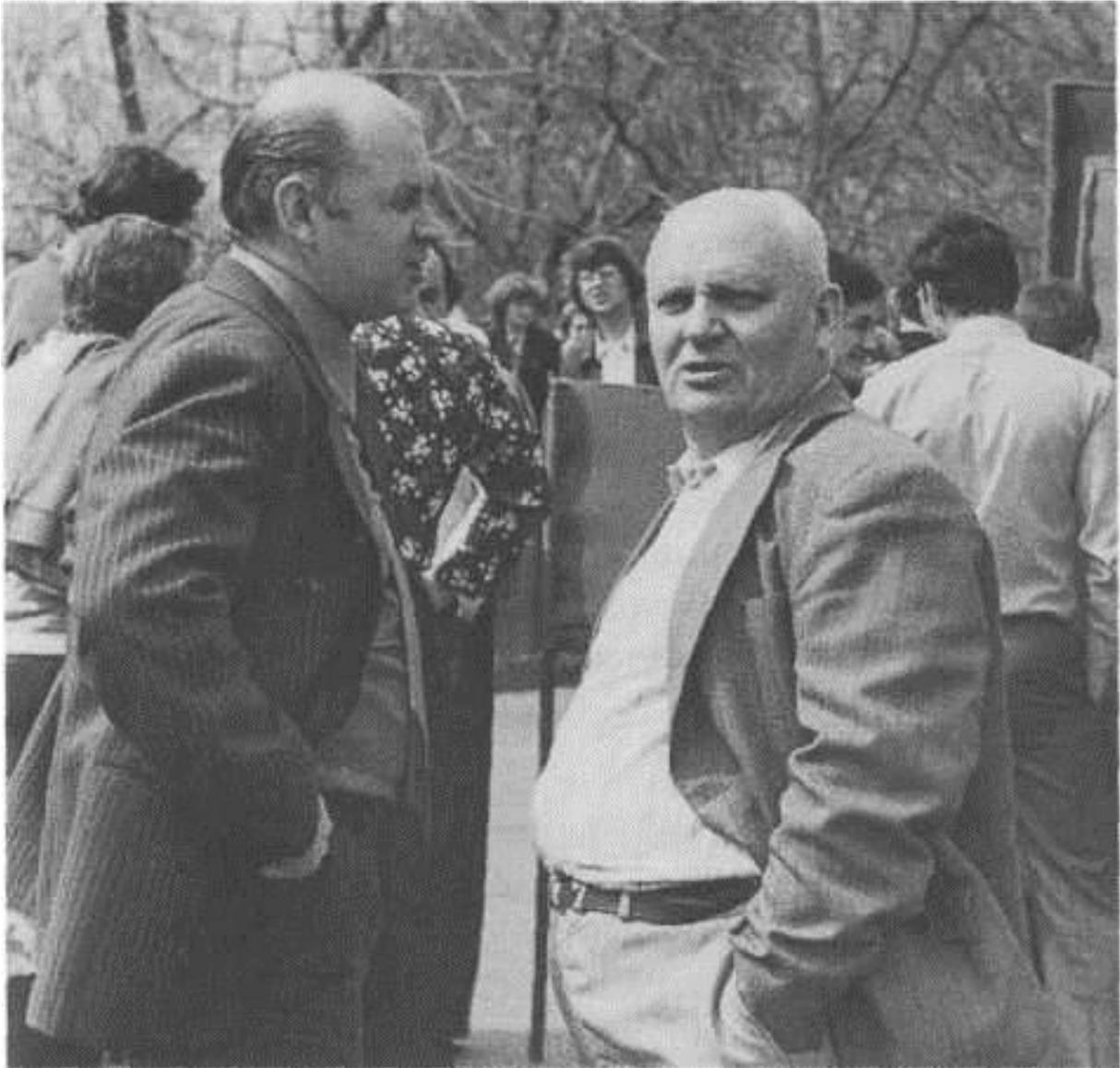
Перед вами сборник материалов V Международной научно-практической конференции «Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве», посвященной 50-летию со дня основания кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» (ПСК) Тверского государственного технического университета.

Кафедра была основана в 1970 г. До этого времени (с 1965 г.) подготовка специалистов строительного-технологического профиля велась на кафедре строительного производства, из числа преподавателей которой, помимо ПСК, были образованы и некоторые другие кафедры университета.

Основателем и первым заведующим (по 1992 г.) кафедрой «Производство строительных изделий и конструкций» Калининского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института являлся ученый с мировым именем, создатель теории формования асбоцементных изделий, получившей международное признание, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Иван Иванович Берней (1917–1997). На кафедре под руководством И.И. Бернея на высоком учебно-методическом уровне был организован учебный процесс, все студенты старших курсов специальности ПСК стали проводить учебно-исследовательскую работу, что способствовало повышению качества подготовки специалистов.

Из воспоминаний Евгения Иосифовича Ильмера об Иване Ивановиче Бернее: «На многих людей Иван Иванович производил ошеломляющее впечатление. Мне он напоминал огромный рычащий бульдозер, сметающий все со своего пути. Раньше не приходилось видеть человека, который бы непрерывно, в буквальном смысле этого слова, и так напряженно работал над научными и техническими проблемами. И в эту работу он пытался втянуть всех – и преподавателей, и студентов. Требования, предъявляемые им, были не под силу большинству окружающих, и с ним оставались самые стойкие, самые преданные делу и Учителю...».

Каждый понедельник Иван Иванович приходил на работу с пачкой плотно исписанных листов, где каждому сотруднику давались подробнейший перечень заданий и описание методик проведения новых работ. Каждую неделю все должны были отчитываться о выполненных работах. И так год за годом! Сам Иван Иванович не знал усталости, посвящал научной работе все свое время и требовал того же от окружающих. Он считал, что отпуска сотрудников и каникулы студентов слишком продолжительны, и часть их, конечно же, нужно тратить на научную работу. Был уверен, что преподаватель, не занимающийся наукой, не сможет научить студента, а студент не может стать хорошим специалистом, не поработав с ученым.



И.И. Берней (справа) и В.А. Долгов

На лекциях профессор И.И. Берней поражал студентов огромной эрудицией и разносторонностью. Учащимся приходилось готовиться к занятиям, как к хорошему зачету. Лектор мог спросить любого по уже разобранному материалу, знание предыдущего курса тоже было обязательно. Для дипломников чтение последних статей отечественных и зарубежных журналов считалось нормой.

Иван Иванович не завершил своей последней работы по обоснованию метода тепловлажностной обработки свежеотформованных цементных изделий, обещающей качественное повышение их прочности. Верится, что эту работу закончат его ученики, что и будет лучшей памятью И.И. Бернею.

Очень тепло сказал о нем доцент Ю.А. Шлапаков: «Очень редко, но бывают ученые особого полета, и обычные правила к ним не применимы. Их работы всегда ярки и свежи, а в сознании других людей их мощный научный облик с годами приумножается, отливаясь новыми гранями. Вот таким ученым и был Иван Иванович Берней. И не только ярчайший педагог, но и Учитель. Это человек, для которого главным занятием являлась творческая работа, приносящая ему необыкновенное удовлетворение и радость. Все это выделяло его на фоне других, даже талантливых людей. Я искренне горжусь, что являюсь его учеником, и с благодарностью вспоминаю те годы, которые я проработал вместе с ним».

Со дня основания на кафедре ПСК трудились талантливые педагоги и ученые:

кандидаты технических наук доценты В.М. Петров, В.В. Богданов, Г.М. Мешалкин, А.В. Исаев;

старшие преподаватели Н.А. Коренева, Т.С. Какаулина, Н.Г. Кедрова и др.

С 1993 г. кафедрой ПСК заведует ученик И.И. Бернея доктор технических наук профессор Владимир Владимирович Белов – специалист в области разработки малоэнергоемких ресурсосберегающих технологий стеновых и теплоизоляционных материалов с учетом закономерностей структурообразования в дисперсных системах.

В настоящее время на кафедре работают кандидаты технических наук доценты Валерий Иванович Трофимов, Виктория Борисовна Петропавловская, Матвей Александрович Смирнов, Татьяна Борисовна Новиченкова, Юрий Юрьевич Курятников. Кафедра своей успешной работой во многом обязана учебно-вспомогательному персоналу.

В настоящее время кафедра «Производство строительных изделий и конструкций» выпускает:

бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 Строительство, профиль «Производство строительных материалов, изделий и конструкций»;

магистров по направлению подготовки 08.04.01 Строительство, профиль «Технология строительных материалов, изделий и конструкций»;

кадры высшей квалификации (аспирантура) по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность (профиль) подготовки «Строительные материалы и изделия».

Основное научное направление кафедры – использование местных ресурсов и отходов промышленности для получения эффективных экологически безопасных строительных материалов нового поколения. Умелое повторное использование отходов промышленности, вовлечение их в технологический процесс, создание безотходных технологий в перспективе – все эти важнейшие исследования и инновационные разработки в области строительства и строительных материалов успешно выполняются

коллективом кафедры ПСК в составе академического научно-творческого центра «Тверьстройнаука» РААСН при ТвГТУ.

Для осуществления научно-исследовательской деятельности кафедра оснащена современным научным и испытательным оборудованием. Ежегодно преподаватели и студенты участвуют в работе международных, всероссийских и региональных симпозиумов, конференций и семинаров, что позволяет преподавателям и будущим молодым специалистам получать знания и обмениваться опытом по новейшим разработкам в области современных высоких технологий производства строительных материалов и изделий.

На кафедре активно ведется научно-исследовательская работа студентов, организована подача студентами заявок на выдачу патентов на изобретения. Студенческие научные работы и дипломные проекты ежегодно участвуют в региональных и всероссийских конкурсах, где награждаются почетными грамотами, дипломами и медалями.



Коллектив кафедры

Одни из последних разработок кафедры «Производство строительных изделий и конструкций», запатентованные или патентуемые в настоящее время и предлагаемые для промышленного внедрения:

стенные и облицовочные изделия на основе безобжигового гипса из техногенных отходов;

высокопрочные мелкозернистые бетоны и фибробетоны;

новые виды сухих строительных смесей (вспучивающиеся с волокнистым наполнителем для изготовления дисперсно-армированного неавтоклавного газобетона; общестроительные смеси улучшенного качества, модифицированные отечественной полимерной добавкой);

неавтоклавный ячеистый бетон на основе отвалных зол гидроудаления, волокнистых и пылевидных базальтовых отходов.

В 2010 г. на базе кафедры ПСК организован научно-испытательный центр «Строительная лаборатория кафедры ПСК», оснащенный современным научным и испытательным оборудованием как зарубежных, так и отечественных фирм, что позволяет решать задачи по улучшению качества выпускаемой заводами стройиндустрии продукции, в том числе новой, с применением новых технологий. Центр с момента образования регулярно проходит аттестацию в Тверском центре стандартизации и метрологии на наличие условий для выполнения измерений и испытаний в области строительных материалов и изделий.

Основная цель работы кафедры в настоящее время – сохранить и по возможности приумножить достижения как в учебно-методической, так и научной и производственной работе. Кафедра имеет устойчивый кадровый состав. Помимо этого, идет постоянный процесс омоложения кадров и повышения их квалификации.

**Белов Владимир Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Производство строительных изделий и конструкций» Тверского государственного технического университета, Советник Российской государственной академии архитектуры и строительных наук, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Почетный работник науки и образования Тверской области, Почетный работник Тверского государственного университета

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИННОВАЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА В РОССИИ

Артемьев А.А., Лепехин И.А., Ефимов И.Д.

© Артемьев А.А., Лепехин И.А.,  
Ефимов И.Д., 2021

***Аннотация.** Землеустройство, как социо-эколого-экономическая составляющая регулирования земельно-имущественных отношений, является одной из научно-технических и социально-политических частей государственного управления земельными ресурсами. Моделирование и проектирование в сфере землеустройства – это важная инновационная часть стратегии территориального развития, базирующейся на многообразии методов организации территории путем землеустройства. В статье проведен ретроспективный анализ этапов и направлений развития землеустройства в России, а также моделирования в землеустройстве.*

***Ключевые слова:** землеустройство, этапы развития, моделирование и проектирование, инновации, направления развития землеустроительной науки, направления развития моделирования в землеустройстве.*

Моделирование и проектирование землепользования с учетом классификационных групп как природных, так и социально-экономических факторов в сфере землеустройства являются одними из важных составляющих стратегии территориального развития, базирующейся на многообразии методов организации территории путем землеустройства. Схема землеустройства – основной документ, который позволяет решить проблему рационального и эффективного использования, а также охраны земель на всех уровнях управления и является основой для дальнейшего моделирования и проектирования развития конкретной территории. Полученные модели позволяют проводить мониторинг и дальнейшее прогнозирование состояния и использования земель, могут служить основой для оценки их состояния и перспективы дальнейшего развития территории с учетом всех классификационных групп социо-эколого-экономических факторов. Это определяет высокую степень актуальности моделирования при осуществлении землеустройства, значимость его теоретической направленности и практического вклада в решение проблем управления земельными ресурсами.

Необходимо отметить, что на протяжении многих веков земля воспринималась лишь как главное средство производства. Однако в современных политических и социально-экономических реалиях ее рассматривают еще и как недвижимое имущество, имеющее собственника и подлежащее государственной регистрации в Едином государственном реестре недвижимости (далее – ЕГРН) России.

Ретроспективный анализ организации землепользования показывает, что землеустроительная наука в России прошла ряд этапов в развитии.

Первыми учебниками по практическому землемерию были «Арифметика» Л.Ф. Магницкого (1703), «Практическая геометрия» С.И. Назарова (1760), «Краткое математическое изъяснение землемерия межевого» Д.П. Цицианова (1757) и работа С.К. Котельникова «Молодой геодет, или Первые основания геодезии» (1775).

Следовательно, для подготовки землемеров и обустройства территорий существовали только учебники по практической геометрии, которая означала понятия «низшая геодезия», «землеизмерение».

Первые научные исследования в области землемерного дела в России появились только в начале XIX в. Это связано с тем, что проведение только одной практической геометрии перестало удовлетворять землемеров и землепользователей. Поэтому началось разделение землемерного дела на две отдельные науки: практическое землемерие (первый этап) и межевание (второй этап), но в данном временном периоде еще не затрагивались вопросы научно обоснованного использования земель.

Первым научным изданием в системе естественных наук, обосновавшим различия между геодезией и геометрией, была изданная А.П. Болотовым в 1836 г. книга под названием «Геодезия», признанная лучшей в Европе. Автор убедительно доказал, что геодезия и геометрия «принадлежат двум отдельным наукам», т. е. «практическая геометрия – это низшая геодезия, землеизмерение, а прикладная геометрия – это высшая геодезия, межевание».

Исследования в области землеустройства и землепользования (в их современном понимании) начались в России с изучения истории межевания, а также развития межевых законов, определяющих порядок производства землеустроительных работ. В период 1824–1847 гг. были изданы книги «Теория межевых законов» В.С. Алеева (1824), «Исторический взгляд на межевание в России до 1812 г.» П.И. Иванова (1844) и ряд других, получивших признание работников правительственных учреждений России того времени.

Центральный труд по исследованию межевания был подготовлен сотрудниками Межевого управления в 1863 г. для оказания содействия начатым тогда работам по преобразованию межевой части в России после отмены крепостного права, что потребовало выполнения большого количества

межевания земельных участков. Труд состоял из пяти книг под общим названием «Материалы для преобразования межевой части в России».

В конце XIX – начале XX вв. наблюдается всплеск научных исследований в области землеустройства в связи с проведением масштабных исследований по определению астрономических координат различных пунктов, проведению картографических и топографических работ на всей территории России.

В это же время начала формироваться Московская землеустроительная школа, где ведущее положение занимали профессора Константиновского межевого института О.А. Хауке, И.Е. Герман, А.А. Ржаницын, С.П. Кавелин и другие ученые.

Из научных работ, которые внесли вклад в становление землеустроительной науки в дореволюционной России, можно отметить «Очерки землеустроительного права. Выпуск 1. Понятие о землеустройстве, его задачи и основные черты» О.А. Хауке (1914), «Историю русского межевания» И.Е. Германа (1914), «Руководство по землеустройству и межеванию» А.А. Ржаницына (1910), «Межевание и землеустройство» С.П. Кавелина (1914), «Русское землеустройство» А.А. Кофода (1914) [6–9].

К 1910 г. вышли два полных издания законов Российской Империи, включающих в себя межевые законы. Кроме того, в изданиях «Межевой вестник» (1883–1884), «Труды Топографо-геодезической комиссии», «Вопросы межевания и землеустройства», «Землемерное дело» публиковались научные статьи по вопросам землеустройства и межевания.

В период земельной реформы П.А. Столыпина в 1906–1911 гг. ученые землеустроители впервые стали уделять внимание таким действиям, как организация территории в крестьянских хозяйствах и имениях, проведение культуртехнических мероприятий, оценка земель, сельское строительство и другие на основе специально разрабатываемых проектов. Поэтому с 1915 г. в Константиновском межевом институте раздел «Землеустроительное проектирование», входивший в курс «Геодезия», был выделен в самостоятельную научную дисциплину [1, 6, 9].

Необходимо отметить, что, несмотря на наличие значительных научных работ в области землеустройства в дореволюционной России, его теоретические основы начали только формироваться. Отсутствовали полноценные ответы на вопросы, связанные с переходом страны к рациональным формам землевладения и землепользования, научно обоснованным методам землеустройства. Необходимы были крупномасштабные исследования в области почвоведения и территориального устройства, проектирования развития территорий, которые не были осуществлены из-за революционных событий 1917 г. Помимо этого, после революции в связи с декретом «О земле» и переделом земли были проведены кардинальные изменения в землепользовании и землеустройстве.

Для разработки новой социалистической теории землеустройства в 1922 г. был образован Государственный научно-исследовательский институт землеустройства и переселения, началось издание журнала «Землеустроитель» (впоследствии «Вестник землеустройства и переселения»), создавались различные общественные землеустроительные организации. С середины 20-х гг. XX в. центром научных исследований в области землеустройства стал Московский межевой институт (в настоящее время Государственный университет по землеустройству).

В 1920-е гг. в Государственном научно-исследовательском институте землеустройства и переселения при участии профессоров и преподавателей Московского межевого института проведены экспедиционные обследования для определения состояния землепользования и землеустройства ряда областей. Например, под руководством профессора П.Н. Першина проведены исследования по землеустройству в Саратовской области, а под руководством профессора М.М. Шульгина – по организации и методам проведения земельного кадастра [9].

В эти годы широко использовались такие труды, как «Внутрирасселенное и междуселенное землеустройство» А.А. Ржаницына (1927), «Землеустройство колхозов» И.Д. Шулейкина (1928) и «Землеустроительное проектирование» К.Н. Сазонова (1929).

В период с 1917 по 1932 г. в Советской России сложились различные теории землеустройства: административно-правовая, технико-геодезическая и социально-экономическая.

Новое социально-экономическое направление землеустройства с середины 1930-х до начала 1970-х гг. развивал ученый Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук имени В.И. Ленина С.А. Удачин, возглавлявший кафедру землеустроительного проектирования в Московском институте инженеров землеустройства. Им было предложено деление землеустройства на два основных вида: межхозяйственное и внутрихозяйственное. Также он разработал содержание внутрихозяйственного землеустройства, предложил и обосновал его составные части и элементы, что прочно вошло в практику современного землеустройства. Под редакцией С.А. Удачина был создан фундаментальный учебник по землеустроительному проектированию, в котором были сформулированы научное понятие землеустройства, его цели, задачи, закономерности развития и общие принципы. В этот период, начиная с 60-х гг. XX в., стали применяться экономико-математические методы, позволившие осуществлять моделирование в землеустройстве. Следовательно, можно сделать вывод, что в СССР система планирования использования земель сформировалась в 1960–1970-е гг. и с бóльшим или меньшим успехом функционировала до начала перестроечных процессов в экономике стран Советского Союза, также на ее основе заложена система и современного землеустройства России.

Необходимо отметить сложившийся комплексный подход к землеустроительному проектированию в СССР. С 1974 г. планирование использования земельных ресурсов реализовывалось в составе Государственного плана экономического и социального развития СССР в разделе «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» в форме схем землеустройства союзных республик, краев, областей и административных районов. Такие схемы были разработаны практически на все области, края и административные районы СССР, выпущены указания и пособия по их составлению. Обозначенные схемы можно считать прототипами моделей развития конкретных территорий. Проведенные исследования показывают, что данная система имела узковедомственный характер, была громоздка, излишне централизована и политизирована, часто оторвана от реальной ситуации на местах.

В период с 1968 по 1992 г. центром научных исследований становится Государственный научно-исследовательский институт земельных ресурсов в Москве, который вел исследования в области:

- разработки генеральных схем использования и охраны земельных ресурсов страны, республик, областей, краев;
- разработки порайонных особенностей землеустройства;
- планирования и прогнозирования использования земель.

На данном временном промежутке (в 80-х гг. XX в.) осуществлено техническое обоснование землеустройства, созданы и внедрены автоматизированные системы плановых расчетов, а также проектирования и анализа. Произошла своего рода автоматизация рабочих мест в землеустройстве. Появилась возможность работать с персональными электронно-вычислительными машинами в интерактивном (диалоговом) режиме.

С конца 1960-х гг. по 2002 г. землеустроительные исследования вело объединение Российского научно-исследовательского и проектно-исследовательского института земельных ресурсов с двенадцатью зональными научно-исследовательскими институтами и семьюдесятью предприятиями.

В 90-х гг. XX в. произошло почти полное техническое перевооружение землеустроительной службы страны, что позволило поставить экономико-математические исследования в землеустройстве на качественно новый уровень, создавать довольно обоснованные модели при осуществлении землеустройства.

В наши дни реализуется проект по созданию 3D-проектов в землеустройстве и разработке трех- и четырехмерного кадастра недвижимости в РФ. Трех- и четырехмерное отображение местности и расположенных на ней объектов значительно расширяет возможности землеустройства и кадастрового учета, упрощает процесс моделирования и разработки наиболее рационального использования земельных ресурсов конкретной территории. Однако необходимо отметить, что внедрение технологии по

созданию 3D-проектов (моделей) в землеустройстве и 3D-кадастра потребует как решения различных инновационных технологических вопросов, так и изучения и изменения нормативно-правовой базы кадастровой деятельности, существенного изменения подхода к подготовке и переподготовке кадров. В настоящее время центр землеустроительной науки находится в Государственном университете по землеустройству в Москве. Большую научно-исследовательскую работу в области землеустройства и кадастров ведут в других высших учебных заведениях и землеустроительных школах Нижнего Новгорода, Воронежа, Санкт-Петербурга, Ростова, а также в Министерстве экономического развития России и Росреестре [2, 8, 9].

Проведенные исследования показывают, что моделирование и проектирование в землеустройстве в России с 60-х гг. XX в. до наших дней прошло несколько этапов.

Первый относится к началу 60-х гг. XX в., когда экономико-математические методы и моделирование стали применяться в землеустройстве. В это время были сформулированы основные экономико-математические задачи; использовались методы линейного программирования, а также приемы динамического, параметрического, целочисленного и стохастического программирования; были построены линейные, параболические, гиперболические и другие производственные функции; применялись методы сетевого планирования и управления земельным процессом. На этом этапе моделировались и решались в основном задачи проектов внутрихозяйственного землеустройства.

Второй этап внедрения экономико-математических методов и моделирования в землеустройстве относится к 80-м гг. XX в. Он связан с обоснованием и созданием автоматизированных систем плановых расчетов, автоматизированного проектирования, разного рода автоматизированных рабочих мест в землеустройстве. Впервые появилась возможность работать с персональными электронно-вычислительными машинами в интерактивном (диалоговом) режиме.

На третьем этапе, который начался в 90-е гг. XX в., произошло почти полное техническое перевооружение землеустроительной службы страны, что позволило поставить экономико-математические исследования в землеустройстве на качественно новый уровень.

На четвертом этапе, который приходится на настоящее время, реализуется программа по созданию 3D-проектов в землеустройстве и разработке трехмерного кадастра недвижимости РФ. В ней участвуют Министерство экономического развития России и Росреестр. Трехмерное отображение местности и объектов, размещенных на ней, значительно расширяет возможности землеустройства и кадастрового учета, а также механизмы обеспечения прав собственности, планирования и проектирования. Возможность регистрации недвижимости и прав на нее в трехмерном

измерении позволит оптимизировать использование пространства. Внедрение технологии по созданию 3D-проектов в землеустройстве и 3D-кадастра потребует как решения различных технологических вопросов, так и изучения и изменения нормативно-правовой базы кадастровой деятельности. Базисом для создания трехмерного кадастра в нашей стране, вероятно, должны стать трехмерные геоинформационные системы, объединяющие традиционные операции при работе с базами данных (запрос и статистический анализ) с преимуществами полноценной визуализации и географического (пространственного) анализа, которые предоставляет карта. Эта особенность дает уникальные возможности для применения систем в решении широкого спектра задач, связанных с анализом явлений и событий, прогнозированием их вероятных последствий, планированием стратегических решений [6–9].

Главным условием для эффективного функционирования предлагаемой трехмерной технологии будет окончание работ по созданию существующего в данный момент двухмерного кадастра, его информационного наполнения. Двухмерный кадастр, как известно, также находится на этапе реформирования. Не стоит забывать, что территория России во много раз превышает площадь Нидерландов, чей опыт мы перенимаем, в то же время плотность застройки в нашей стране значительно различается в зависимости от размеров населенных пунктов, климатических зон и ряда факторов. В связи с этим представляется апробация на первоначальном этапе системы 3D-кадастра для крупных городов нашей страны, что позволит рационализировать финансовые затраты на внедрение системы и усовершенствовать ее, используя собственный опыт.

Учет данных особенностей социально-экономического развития России на пути внедрения трехмерного кадастра в совокупности с совершенствованием нормативно-правовой базы системы государственного учета объектов недвижимости и развитием информационных технологий позволят создать в нашей стране эффективную систему трехмерного кадастра, которая будет способствовать защите интересов государства, бизнеса и граждан. Следующим шагом в данном направлении должно стать развитие инновационных систем уже 4D-кадастра, позволяющего видеть изменения объектов недвижимости во времени, работа над которым уже идет в Европе [1–3, 6, 8].

В условиях проводимых крупномасштабных земельных преобразований существенно должны возрасти и объемы землеустроительных работ в России, а также повышаться требования по обоснованию проектных землеустроительных решений, что невозможно эффективно осуществлять без использования моделирования в землеустройстве, развитие систем 3D- и 4D-кадастра.

Необходимость и целесообразность применения автоматизированных систем проектирования и 3D-моделирования также обусловлены и тем, что в настоящее время количество и объемы землеустроительных работ будут расти. Это можно объяснить тем, что в ходе земельных преобразований землевладений и землепользовании сельскохозяйственных предприятий существенно возросло перераспределение земель, количество отводов земель юридическим и физическим лицам, также наблюдается активизация земельного оборота, связанная с переходом земель от менее эффективных к более эффективным собственникам. На рост землеустроительного проектирования, а следовательно, и актуальность применения автоматизированных систем проектирования и 3D-моделирования также повлияет необходимость решения природоохранных и строительных задач, продолжения разделения собственности в РФ на федеральную, субъектов Федерации, муниципальную и частную, дальнейшего межевания земель, продолжающейся демаркации и делимитации границ и т. д.

Вместе с тем число специалистов в данной области не растет, а имеет тенденцию к снижению. Поэтому выполнение всех необходимых работ возможно только путем ощутимого повышения производительности труда кадастровых инженеров, улучшения качества проектно-изыскательских работ по землеустройству на основе внедрения автоматизированных технологий.

Любая система (социальная, экономическая, производственная или информационная) претерпевает определенные изменения, связанные с внешними и внутренними факторами. Успешность деятельности любой организации во многом определяется и тем, насколько адекватно, быстро и эффективно она способна трансформироваться в соответствии с быстро изменяющимися условиями. Проект как особая форма осуществления целенаправленных изменений предполагает, что они должны быть реализованы в рамках определенных ограничений по срокам, стоимости и характеристикам ожидаемых результатов. Данные ограничения способствуют появлению специальных требований к организации и методам управления, суть которых состоит в концентрации полномочий и ответственности за весь проект в целом в руках одного человека (руководителя проекта) и создании компетентной команды проекта, в той или иной степени отчуждаемой на время исполнения проекта от подразделений компании. Проект становится центром затрат и прибылей, что позволяет организовать учет трудовых, материальных и финансовых ресурсов и выстроить систему мотивации, базирующуюся на конкретных результатах участников проекта.

Результаты землеустройства:

реализация политики государства по научно обоснованному перераспределению земель, формированию рациональной системы землевладений и землепользований с устранением недостатков в расположении земель,

создание экологически устойчивых ландшафтов и агросистем, а также инновационное развитие систем 3D- и 4D-кадастра;

информационное обеспечение правового, экономического, экологического и градостроительного механизмов регулирования земельных отношений на национальном, региональном, локальном, хозяйственном уровнях путем разработки предложений по установлению особого режима и условий использования земель;

установление на местности границ административно-территориальных единиц, территорий с особым природоохранным, рекреационным и заповедным режимами, границ земельных участков собственников и землепользователей;

осуществление мероприятий по прогнозированию, планированию, организации рационального использования и охраны земель на национальном, региональном, локальном и хозяйственном уровнях;

рациональная и эффективная организация территорий сельскохозяйственных предприятий с созданием пространственных условий, обеспечивающих эколого-экономическую оптимизацию использования и охраны земель сельскохозяйственного назначения, внедрение прогрессивных форм организации управления землепользованием, совершенствование соотношения и размещения земельных угодий, системы севооборотов, сенокоса и пастбищеоборотов;

разработка и обоснование системы мероприятий по сохранению и улучшению природных ландшафтов, восстановлению и повышению плодородия почв, рекультивации нарушенных земель и землеванию малопродуктивных угодий, защите земель от эрозии, подтопления, высушивания, сдвигов, вторичного засоления и заболачивания, уплотнения, загрязнения промышленными отходами и химическими веществами и других видов деградации, по консервации деградированных и малопродуктивных земель, предупреждению других негативных явлений;

организация территорий несельскохозяйственных предприятий, организаций и учреждений с целью создания условий эффективного землепользования, ограничений и обременений в использовании земель [4–8].

Эффективное функционирование землеустройства тесно связано с применением инновационных подходов к управлению. Использование производственных ресурсов хозяйствующего субъекта, независимо от формы собственности и организационно-правовой формы, должно производиться на основе оценки их количества и качества при организации и планировании работ. Применение методов математического и сетевого, а также 3D-моделирования позволяет не только оценить производственный потенциал предприятия, но и произвести календарное планирование работ над проектом, определить направления наиболее эффективного использования имеющихся или приобретаемых ресурсов, особенно земельных. Поэтому по мере

развертывания инновационной информационной инфраструктуры и накопления данных на основе внедрения новейших геоинформационных технологий, компьютерных систем сбора, обработки, моделирования и передачи данных будет осуществляться переход к формированию комплексной земельно-информационной системы, ориентированной на информационное обеспечение управления земельными ресурсами на всех административно-территориальных уровнях.

В настоящее время в связи с социально-экономическими преобразованиями и изменением системы земельных отношений предъявляются новые требования к теории и методике землеустройства, моделирования и кадастра недвижимости.

В качестве направлений развития землеустроительной науки можно выделить:

проведение фундаментальных научных исследований в области теории землеустройства, учитывающих многообразие форм собственности на землю, землевладения, землепользования и хозяйствования;

использование государственного управления земельными ресурсами и на основе этого теоретической и практической отработки и обоснование содержания и методов, а также моделей составления схем землеустройства территории РФ, субъектов и территориальных образований;

инвестиционное землеустроительное моделирование и проектирование, при котором должны определяться новые подходы к социо-эколого-экономическому обоснованию использования земель различных территорий;

разработку новых методов установления и упорядочения границ административно-территориальных образований, территорий с особым правовым режимом, реорганизации сельскохозяйственного землепользования, размещения территорий особо охраняемых и закрытых земель, традиционного природопользования в местах проживания коренных малочисленных народов Севера, Сибири, Дальнего Востока и т. д.;

развитие нормативно-правового обеспечения землеустройства, планирования цен на проектно-изыскательские работы, организацию и оплату труда при проведении землеустроительных работ, лицензирование и экспертизы в землеустроительном производстве;

развитие в области землеустройства методов проведения землеустроительных работ на землях сельскохозяйственного назначения, позволяющих оптимизировать выделение и определение направлений использования как востребованных, так и невостребованных долей;

в области разработки проектов использования и охраны земель сельскохозяйственного назначения оптимизацию алгоритмов создания проектов по использованию земель, а также выбор вариантов, гарантирующих наиболее экологически безопасное размещение сельскохозяйственного

производства, что обеспечит снижение природной и антропогенной нагрузки на земельные ресурсы, на более высоком уровне необходимо осуществление эколого-ландшафтной организации территории, планирование и реализация комплекса почвозащитных мероприятий и малозатратных систем земледелия, обеспечивающих плодородие почв;

проведение теоретических и экспериментальных исследований для разработки новой системы землеустройства, ориентированной на создание системы адаптивного земледелия с природоохранными мероприятиями;

разработку и внедрение трехмерного кадастра в совокупности с совершенствованием нормативно-правовой базы системы государственного учета объектов недвижимости и дальнейшее развитие информационных технологий;

развитие систем 4D-кадастра, позволяющего видеть изменения объектов недвижимости во времени.

Необходимо отметить, что проведение научно-практических исследований в землеустройстве и кадастрах должно опираться на использование современных цифровых технологий, географических и земельно-информационных систем.

Опыт экономически развитых стран убедительно свидетельствует, что сочетание методов планового регулирования и рыночных механизмов основано на принципах соблюдения партнерских отношений органов государственного управления с различными субъектами управления и хозяйствования, имеющими интересы на территории региона.

Создание механизма управления земельными ресурсами, основными инструментами которого являются моделирование и планирование рационального использования и охраны земель, позволит объединить в единое целое все многофункциональные формы землепользования.

Необходимо отметить, что такой аспект, как моделирование и планирование использования земель административно-территориальных образований, является одним из наиболее важных комплексов землеустроительных работ. В настоящее время он является основным рычагом государственной земельной политики и регулирования земельных отношений. Следовательно, для повышения действенности данных инструментов моделирование и планирование использования земель должно проводиться на основе государственных, региональных и муниципальных планов использования и охраны земель в целях первоочередного служения общественным интересам, создания устойчивого производства, охраны объектов, имеющих историческое, культурное и научное значение.

### **Библиографический список**

1. Артемьев А.А., Лазарева О.С., Лепехин И.А. К вопросу использования геоинформационных систем в управлении земельными ресурсами

// Строительство и землеустройство: проблемы и перспективы развития: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 16–20.

2. Артемьев А.А., Лепехин И.А. Управление землями сельскохозяйственного назначения в России: опыт, проблемы и возможные пути их решения // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2019. № 1. С. 59–66.

3. Артемьев А.А., Лепехин И.А., Ефимов И.Д. Экономическая сущность землеустройства в современных российских условиях // Актуальные проблемы экономики и управления: материалы Международной научно-практической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 10–13.

4. Артемьев А.А., Лепехин И.А., Стулова Д.В. Система управления землями сельскохозяйственного назначения: современное состояние и направления развития // News of Science and Education. 2019. Т. 4. № 1. С. 37–41.

5. Артемьев А.А., Степанов В.Я., Ефимов И.Д. Государственное и муниципальное управление территориями: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 124 с.

6. Артемьев А.А. История земельных отношений и землепользования в России: монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 227 с.

7. Артемьев А.А., Лазарев О.Е., Лазарева О.С. Учет и регистрация объектов недвижимости: история и современное состояние: монография. Тверь: ТвГТУ, 2017. 168 с.

8. Белов В.В., Артемьев А.А. Моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве: монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 160 с.

9. Волков С.Н. Землеустройство. Системы автоматизированного проектирования в землеустройстве. Т. 6. М.: Колос, 2002. 328 с.

## **MODELING AS AN INNOVATIVE DIRECTION OF LAND MANAGEMENT DEVELOPMENT IN RUSSIA**

**Artemyev A.A., Lepexhin I.A., Efimov I.D.**

***Abstract.** The article emphasizes that one of the scientific, technical and socio-political parts of state land administration is land management, as a socio-environmental-economic component of the regulation of land and property relations. Modeling and design in the field of land administration is one of the important innovative components of the strategy of territorial development, based on the diversity of methods of organizing the territory through land management. In the article, a retrospective analysis of the stages of land management development in Russia was carried out, directions for the development of land management science, as well as modeling in land management were outlined.*

**Keywords:** *land management, stages of development, modeling and design, innovations, directions for the development of land management science, directions for the development of modeling in land management.*

Об авторах:

АРТЕМЬЕВ Алексей Анатольевич – доктор экономических наук, доцент, проректор по НИИД, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: [aaartemev@rambler.ru](mailto:aaartemev@rambler.ru)

ЛЕПЕХИН Илья Александрович – кандидат юридических наук, доцент кафедры геодезии и кадастра, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», доцент кафедры государственного и муниципального управления Тверского филиала РАНХиГС, Тверь. E-mail: [ilja-lepehin@rambler.ru](mailto:ilja-lepehin@rambler.ru)

ЕФИМОВ Иван Данилович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры геодезии и кадастра, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь.

About the authors:

ARTEMYEV Alexey Anatolyevich – Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Vice-Rector, Tver State Technical University, Tver. E-mail: [aaartemev@rambler.ru](mailto:aaartemev@rambler.ru)

LEPEKHIN Ilya Alexandrovitch – Candidate of Juridical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Inventory, Tver State Technical University, Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration of the Tver Branch of RANEPА (part-time), Tver. E-mail: [ilja-lepehin@rambler.ru](mailto:ilja-lepehin@rambler.ru)

EFIMOV Ivan Danilovich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Cadastre, Tver State Technical University, Tver.

## ВЛИЯНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА ГИПСОИЗВЕСТКОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Бахтин А.С., Любомирский Н.В., Бахтина Т.А., Биленко Г.Р.

© Бахтин А.С., Любомирский Н.В.,  
Бахтина Т.А., Биленко Г.Р., 2021

***Аннотация.** В статье представлены результаты влияния принудительной карбонизации на свойства гипсоизвестковых систем на основе вторичного сырья. Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить эффективность одновременного протекания в системе карбонатного и гидратационного типов твердения для известкового и фосфогипсового компонентов сырьевой смеси соответственно.*

***Ключевые слова:** фосфогипс, известковая пыль, принудительная карбонизация, свойства.*

Экологическое строительство и формирование безопасной и комфортной среды жизнедеятельности – одни из самых актуальных мировых трендов в строительной отрасли, составляющих понятие «устойчивое развитие». Современная производственная деятельность человека порождает определенные проблемы экологической безопасности, одной из которых является прогрессирующее изменение климата. Согласно международному научному и политическому консенсусу, основная причина происходящих на планете климатических изменений – повышения среднегодовой температуры атмосферы – заключается в усилении парникового эффекта из-за увеличения содержания в атмосфере парниковых газов, в частности углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ). По данным Международного энергетического агентства (МЭА) ежегодные мировые выбросы  $\text{CO}_2$  в период с 2013 по 2019 г. выросли с 32 до 37,1 Гт. Эти данные согласуются с «Докладом об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год» [1], представленным Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Доклад сформирован на основе анализа изменчивости концентрации парниковых газов в РФ, который ведется на пяти станциях. Три станции (Териберка, Тикси и Новый порт) расположены в Арктической зоне РФ и две (Обнинск и Приокско-Тerrasный биосферный заповедник) в Центральном регионе Европейской части России. Согласно данным доклада, концентрация углекислого газа в атмосфере Земли неуклонно растет, в 2019 г. она достигла очередного максимума. Среднегодовое значение на станциях РФ, располо-

женных в фоновых условиях, приблизилось к 414 ppm, а максимальные за год концентрации, наблюдаемые в зимние месяцы, превысили 420 ppm. Рост концентрации CO<sub>2</sub> за 2019 г. превысил наблюдавшийся в 2018 г. и значение средней глобальной скорости роста за предшествующий десятилетний период (2,26 ppm/год).

При этом основными поставщиками техногенного CO<sub>2</sub> в атмосферу Земли являются энергетический, транспортный и промышленный сектора мировой экономики. В связи с обозначенной проблемой наблюдаются консолидированные действия правительств многих стран и различных международных организаций, в том числе и России. Основой этих действий является разработка эффективных мер по снижению техногенных газообразных выбросов, в особенности CO<sub>2</sub>, в различных секторах экономики. Также проблемой является образование и накопление в процессе производства основного продукта миллионов тонн твердых побочных отходов. Как правило, это вторичное сырье направляется в отвалы промышленных предприятий и является источником загрязнения почв, подземных и поверхностных вод тяжелыми металлами, фтором, сульфатами, нитратами, а также воздуха взвешенными твердыми частицами категории PM<sub>2,5</sub>–PM<sub>10</sub> в пятикилометровой зоне вокруг источника. Источниками загрязнения вышеперечисленными отходами и вредными соединениями в основном являются предприятия черной и цветной металлургии, топливной, энергетической и химической промышленности, предприятия по производству строительных материалов, изделий и конструкций, а также автотранспорт.

Наиболее существенным отличительным признаком, повышающим экологизацию строительства, является применение строительных материалов и изделий с низкой эмиссией CO<sub>2</sub> [2–4], изготавливаемых по технологиям, принципиальной особенностью которых является поглощение и связывание (секвестрация) антропогенного углекислого газа (использование его в качестве сырьевого компонента). В промышленности строительных материалов одним из наиболее энергоемких процессов является производство портландцемента, на долю которого приходится 8–9 % антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> во всем мире [5, 6]. Для их сокращения рассматриваются несколько направлений, включающих в себя сокращение потребления энергии при производстве портландцемента, замену портландцементного клинкера вторичным промышленным сырьем [7], разработку альтернативных связующих веществ [8–10] и замену гидратационного твердения вяжущих веществ на карбонатное или их совместное применение [11–13]. Таким образом, анализ литературных источников дает основание предполагать, что использование крупнотоннажного вторичного сырья в производстве строительных материалов и изделий и организация их твердения в среде повышенной концентрации CO<sub>2</sub> позволит получить материалы, отвечающие действующим нормативным требованиям и совре-

менным тенденциям «устойчивого развития». В частности, к перспективному вторичному сырью с точки зрения организации различных типов твердения можно отнести фосфогипс и известковую пыль.

В контексте вышеизложенного целью данной работы являлось изучение эффективности одновременного протекания в системе двух типов твердения – карбонатного и гидратационного – для известкового и фосфогипсового компонентов сырьевой смеси соответственно.

В качестве материалов для научных исследований использовали известковую пыль, механически осаждаемую в циклонах и рукавных фильтрах шахтных печей акционерного общества «Крымский содовый завод» (г. Красноперекоск). Данный материал в основном направляется в отвалы предприятия, поскольку спрос на такое вторичное сырье практически отсутствует. Это объясняется низким качеством продукта, поскольку известковая пыль содержит в своем составе пережженные частицы CaO, а количество активных оксидов кальция и магния, как правило, не превышает 35–45 %. Данный продукт в отвалах предприятия представлен в основном мелкодисперсными частицами Ca(OH)<sub>2</sub> и CaCO<sub>3</sub> со средним размером частиц 15–20 мкм. Таким образом, наличие вредных пережженных частиц в комплексе с низким содержанием активных CaO и MgO обуславливает отсутствие спроса. Также данное предприятие является источником эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу в процессе функционирования известковых шахтных печей. Концентрация углекислого газа в отходящих печных газах варьируется в пределах 37–39 %. В качестве сульфатсодержащего сырья использовали отвальный фосфогипс предприятия ООО «Титановые инвестиции» (г. Армянск), получаемый в процессе производства фосфорной кислоты при переработке апатитового сырья Кольского полуострова. За период функционирования предприятия, по данным учета, в отвалах скопилось примерно 25–27 млн т данного вторичного сырья (рис. 1).

Известно [14], что апатиты Кольского месторождения являются одними из немногих, отвечающих требованиям радиационной безопасности, и, вероятно, фосфогипс, полученный после их переработки и длительное время находившийся в отвалах, пригоден для использования в производстве строительных материалов и изделий. Качественные показатели фосфогипса представлены в табл. 1.



Рис. 1. Технологические карты хранения фосфогипса

Таблица 1

Качественные показатели отвального фосфогипса

№ п/п	Показатель, единица измерения	Значение
1	Содержание кристаллизационной воды, масс. %	19,15
2	Массовая доля общих фосфатов ( $P_2O_5$ ) на сухое вещество, %	0,7
3	Массовая доля общих фторидов (в пересчете на F), %	0,6
4	Массовая доля кадмия (Cd), мг/кг	0,000 09
5	Массовая доля свинца (Pb), мг/кг	0,000 21
6	Массовая доля мышьяка (As), мг/кг	0,000 1
7	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов ( $A_{эфф}$ ), Бк/кг	310,0

Согласно данным, представленным в табл. 1, и в соответствии с ГОСТ 4013-2019 исследуемый отвальный фосфогипс можно отнести ко второму сорту, а удельная эффективная активность естественных радионуклидов ( $A_{эфф}$ ) соответствует первому классу материалов. Таким образом, в соответствии с ГОСТ 125-2018 данный отвальный фосфогипс пригоден для производства гипсовых вяжущих. Проведенный термический анализ показал, что фосфогипс имеет характерный эндотермический эффект в диапазоне температур 100–210 °С, характеризующийся раздвоением в диапазоне температур 100–170 °С и 170–210 °С. Эндоэффект при 100–170 °С соответствует дегидратации двухводного гипса до полугидрата; эндоэффект при 170–210 °С – полному обезвоживанию. Экзотермический эффект в диапазоне температур 310–420 °С также является характерным для гипсо-содержащего сырья и соответствует перестройке кристаллической решетки и превращению в нерастворимый ангидрит. Соответственно, гипсовое вяжущее из фосфогипса получали путем его термической обработки в лабораторном вращающемся сушильном барабане при температуре 165–170 °С и

атмосферном давлении в течение 120 мин. После остывания полученный полугидрат смешивали с известковой пылью в соотношении 1:1. Известковое сырье предварительно высушивалось до постоянной массы в сушильном шкафу. Водосодержание смеси было принято 15 масс. %. Из полученной сырьевой смеси методом полусухого прессования изготавливали образцы-цилиндры диаметром и высотой 30 мм, твердение которых осуществлялось в разработанной лабораторной карбонизационной камере в условиях 35%-й концентрации  $\text{CO}_2$  в течение 90 мин. Давление прессования было принято 30 МПа.

На данном этапе исследований для установления эффективности одновременного протекания в системе карбонатного и гидратационного типов твердения для известкового и фосфогипсового компонентов сырьевой смеси соответственно определяли только физико-механические и гидрофизические характеристики карбонизированных образцов. Характеристики опытных образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики опытных образцов до и после карбонизации

Свойства опытных образцов							
до карбонизации				после карбонизации			
Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение по массе, %	Коэффициент размягчения	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение по массе, %	Коэффициент размягчения
21,1	1 491	22,1	0,4	26,5	1 577	18,9	0,6

Анализ данных таблицы показывает существенные отличия в исследуемых числовых показателях, характеризующих качественное протекание в системе реакции карбонизации известковой составляющей. В предыдущих исследованиях авторов [15–17] установлено, что принудительное карбонатное твердение систем, содержащих известь, сопровождается интенсивным образованием кристаллов карбоната кальция различных полиморфных модификаций (арагонит, кальцит). Результатом этого процесса является уплотнение структуры карбонизированного материала, а соответственно, и увеличение показателей средней плотности, прочности, водостойкости и, как следствие, уменьшение водопоглощения по массе. Данная зависимость в определенной мере прослеживается и в результатах, представленных в табл. 2. Так, прочность при сжатии карбонизированных образцов на 20 % выше аналогичного показателя образцов, не подвер-

женных карбонизации. Для карбонизированных образцов также наблюдается увеличение плотности, водостойкости по коэффициенту размягчения и снижение водопоглощения по массе. Однако следует отметить, что в предыдущих исследованиях [15–17] разница в исследуемых показателях для известково-известняковых систем была более существенна. Объяснением данного факта является качественное определение прохождения реакции карбонизации во всем объеме опытных образцов. Данный показатель определялся распылением на скол образца спиртового раствора фенолфталеина. Результат представлен на рис. 2. Визуальный осмотр окрашенных фенолфталеином сколов образцов показывает, что образование карбонатного камня, составляющего карбонизированный слой, начинается с поверхности образцов и постепенно продвигается вглубь. В средней и нижней частях опытных образцов карбонизированный слой практически отсутствует. Это можно объяснить зависимостью процесса карбонизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  от исходного водосодержания сырьевой смеси. Известно [17, 18], что при высоком водосодержании системы химическая реакция карбонизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  останавливается, соответственно, принятое в исследовании значение в 15 масс. % оказалось завышенным. Результатом этого стало протекание реакции карбонизации в верхней зоне образца и ее дальнейшая остановка.

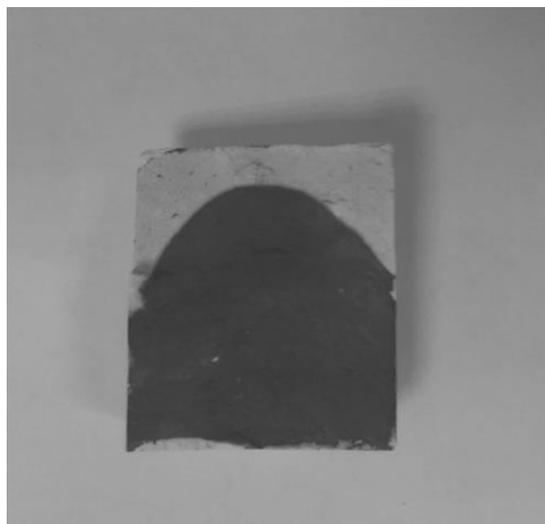


Рис. 2. Толщина карбонизированного слоя опытных образцов

Необходимо отметить, что даже незначительное прохождение реакции и формирование соответствующего карбонатного слоя повлекло за собой определенные различия в исследуемых свойствах опытных образцов (см. табл. 2). Таким образом, можно предположить, что подбор оптимальных технологических факторов получения опытных образцов (водосодержание смеси, давление прессования, состав смеси, время и условия карбонизации) позволит осуществить протекание химической реакции карбонизации по всему объему материала и, следовательно, существенно

повысить исследуемые свойства. Также необходимо отметить, что значения прочности при сжатии, полученные за 90 мин принудительной карбонизации, уже достаточно высокие, а значения водопоглощения и коэффициента размягчения требуют проведения дополнительных исследований для улучшения этих характеристик.

### **Библиографический список**

1. Росгидромет выпустил доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. URL: <https://www.meteorf.ru/press/news/20626/> (дата обращения: 12.01.2021).

2. Ekelu S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO<sub>2</sub> concentration upon natural carbonation of concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. P. 306–320. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056> (дата обращения: 12.01.2021).

3. Ruan S., Unluer C. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 80. P. 104–114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004> (дата обращения: 12.01.2021).

4. CO<sub>2</sub> uptake potential due concrete carbonation: a case study / E. Possan [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. 2017. Vol. 6. P. 147–161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007> (дата обращения: 12.01.2021).

5. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. P. 2–26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015> (дата обращения: 12.01.2021).

6. Review on recent advances in CO<sub>2</sub> utilization and sequestration technologies in cement-based materials / J.G. Jang [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. P. 762–773. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017> (дата обращения: 12.01.2021).

7. Цементы низкой водопотребности – путь эффективного использования клинкера и минеральных наполнителей в бетонах / О.В. Хохряков [и др.] // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. Вып. 10 (109). С. 1145–1152. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1145-1152

8. Sustainable cement production – present and future / M. Schneider [et al.] // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41 (7). P. 642–650. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019> (дата обращения: 12.01.2021).

9. Panesar D.K., Mo L. Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO<sub>2</sub> curing // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 38. P. 40–49. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009> (дата обращения: 12.01.2021).

10. Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A. Can portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements // *Journal of Cleaner Production*.

2018. Vol. 186. P. 933–942. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138> (дата обращения: 12.01.2021).

11. Польшманн Х. Пути сокращения выбросов CO<sub>2</sub> при производстве альтернативных цементов // Цемент и его применение. 2016. № 2. С. 89–101. URL: <https://jcement.ru/magazine/vypusk-2-467/puti-sokrashcheniya-vybrosov-co2-pri-proizvodstve-alternativnykh-tsementov> (дата обращения: 12.01.2021).

12. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю. Повышение эффективности использования отходов пылеочистки базальтовых производств // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 1 (5). С. 25–33.

13. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Завадько М.Ю. Повышение прочности гипсовых строительных материалов и изделий путем принудительной карбонизации // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. № 1. С. 26–30.

14. Чернышева Р.А. Переработка фосфогипса в высококачественные вяжущие материалы // Строительные материалы. 2008. № 8. С. 4–7.

15. Получение строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации / Т.А. Бахтина [и др.] // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 43–57. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.43-57

16. Строительные материалы на основе известковой пыли и мелкодисперсного известняка / Н.В. Любомирский [и др.] // Строительство и реконструкция. 2020. № 4 (90). С. 112–121. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-112-121

17. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw materials / N. Lyubomirskiy [et al.] // Materials. 2020. Vol. 13. Is. 10. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13102304> (дата обращения: 12.01.2021).

18. Van Balen K. Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature // Cement & Concrete Research. 2005. Vol. 35. Is. 4. P. 647–657. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.020

## **THE INFLUENCE OF FORCED CARBONIZATION ON THE PROPERTIES OF GYPSUM-LIME SYSTEMS BASED ON SECONDARY RAW MATERIALS**

**Bakhtin A.S., Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bilenko G.R.**

***Abstract.** The article presents the results of the effect of forced carbonization on the properties of gypsum-lime systems based on secondary raw materials. The analysis of the obtained experimental data made it possible to establish the efficiency of the simultaneous flow of two types of hardening in the*

*system – carbonate and hydration for the lime and phosphogypsum components of the raw mixture, respectively.*

**Keywords:** *phosphogypsum, lime dust, forced carbonation, properties.*

Об авторах:

БАХТИН Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь. E-mail: aleserba@gmail.com

ЛЮБОМИРСКИЙ Николай Владимирович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь. E-mail: niklub.ua@gmail.com

БАХТИНА Тамара Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь. E-mail: t.bakhtina83@gmail.com

БИЛЕНКО Герман Русланович – ведущий инженер в Инжиниринговом центре «Биопозитивное строительство и ресурсосбережение», Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь. E-mail: ger-bilenko@yandex.ru

About the authors:

BAKHTIN Alexander Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol. E-mail: aleserba@gmail.com

LYUBOMIRSKY Nikolay Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Research, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol. E-mail: niklub.ua@gmail.com

BAKHTINA Tamara Alekseevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol. E-mail: t.bakhtina83@gmail.com

BILENKO German Ruslanovich – Leading Engineer at the Engineering Center «Biopositive Construction and Resource Saving», Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol. E-mail: ger-bilenko@yandex.ru

## К ВОПРОСУ О ПОДГОТОВКЕ ИННОВАЦИОННЫХ ИНЖЕНЕРОВ – МЕНЕДЖЕРОВ ИННОВАЦИЙ

Белов В.В.

© Белов В.В., 2021

*Аннотация.* Главным инструментом повышения качества образования в техническом университете является инновационная деятельность преподавателей, студентов и сотрудников, связанная с разработкой востребованных проектов в области модернизации промышленных предприятий и подготовкой для них конкурентоспособных инженерных кадров. Показано, что качество инноваций, основным разработчиком которых выступает специалист инновационного типа, подготовленный в техническом университете, является критерием его личностных качеств, уровня профессиональной подготовки, а в дальнейшем и накопленного опыта работы.

**Ключевые слова:** инновационная деятельность, высшее профессиональное образование, специалист инновационного типа, качество образования.

Инжиниринг (инженерия) – это область человеческой интеллектуальной и практической деятельности, дисциплина, профессия, задачей которой является применение достижений науки, техники, использование законов природы и ее ресурсов для решения конкретных проблем, целей и задач человечества. Исторически возникновение инжиниринга связано со строительством. В дальнейшем смысловое сочетание строительства (построения) и инженерии вошло в определение других технических и научных направлений, например машино-, авиа-, приборостроения и др.

Целенаправленная инновационная деятельность, связанная с процессом непосредственного создания инновационных продуктов, а также структура, процесс и обеспечивающие его методы создания востребованного рынком нового продукта на исполнительском уровне являются по своей сущности инновационным инжинирингом.

Инновационный инжиниринг ориентирован на удовлетворение рыночной потребности, отвечает за создание удовлетворяющего эту потребность инновационного продукта и использует для этой цели все доступные ресурсы.

Любой новый для рынка продукт является результатом инновационного инжиниринга как процесса структурно-функционального соединения

всех необходимых для создания инновации ресурсов, осуществляемого производительными силами.

Большая часть функций инновационного инжиниринга осуществляется в процессе исполнения начальной стадии жизненного цикла технических систем (ЖЦТС), которая названа инновационной. В процессе ее реализации определяются основные характеристики, структурно-функциональная модель будущего объекта техники, его рыночная привлекательность, патентоспособность и др.

Используемые при реализации инновационной стадии ЖЦТС методы должны обеспечивать выполнение всех ее этапов. В перечень методов, используемых в инновационном инжиниринге, входят системный инжиниринг, разнообразие методов активизации творческого мышления, функционально-стоимостный анализ, проверка на патентную чистоту и патентоспособность, инновационный менеджмент, инновационный маркетинг и др.

Важной составляющей инновационного инжиниринга является методика и процесс поиска необходимых для создания инновации ресурсов и производительных сил.

Согласно определению, производительными силами являются специалисты в конкретной области и используемые ими средства производства (инструментальные средства разработки). Применяя профессиональные знания, трудовые навыки, приобретенный опыт и инструментальные средства, инновационные специалисты осуществляют процесс разработки инновационных продуктов.

Средства производства, используемые в процессе разработки инноваций, подразделяются:

на материальные (компьютеры, стенды, технологическое оборудование, приборы, инструменты и т. п.);

нематериальные (программное обеспечение компьютеров общего характера, интернет, используемые в разработках программные инструментальные средства, методики, патентно-информационный фонд, относящиеся к конкретной разработке стандарты и другие нормативные документы).

Характер производственных отношений между непосредственными исполнителями инновационной разработки определяются профессиональной и должностной причастностью каждого из них к конечному результату разработки, порядком прохождения этапов инновационной стадии и психологическими принципами функционирования малых групп.

Процесс взаимодействия и производственные отношения между членами рабочей группы регулируются разработчиком инновации – инновационным инженером, являющимся ответственным исполнителем инновационной стадии ЖЦТС.

Основными задачами, которые должны быть решены в процессе реализации инновационной стадии ЖЦТС, являются:

- всесторонний анализ первичной идеи (ПИ);
- анализ потребности, которая должна быть удовлетворена при реализации ПИ;
- анализ рынка, для которого создается новое изделие;
- проверка новизны инновационного предложения;
- создание рыночного образа инновации;
- построение структурно-функциональной модели будущего изделия;
- осуществление компонентного синтеза;
- разработка и испытания прототипа;
- разработка технического задания для осуществления технического проекта.

Инновационная стадия ЖЦТС начинается с формулирования и анализа ПИ и заканчивается передачей документации и технического задания для дальнейшей разработки проекта в рамках конструкторско-технологической стадии. В решении задач инновационной стадии участвуют менеджер проекта, экономист, инновационный инженер, специалист по маркетингу и патентовед.

Каждый из специалистов, участвующих в разработке этапов инновационной стадии ЖЦТС, выполняет свою часть инновационного проекта, которая определяется для каждого из них соответствующим комплексом задач. Инновационный характер разработки определяется в основном деятельностью инженера, маркетолога и патентоведа.

Процесс разработки инновационной стадии ЖЦТС требует особым образом организованного творческого и интерактивного взаимодействия участвующих в реализации этапов стадии специалистов. В рамках этой стадии инновационный инженер выполняет функции менеджера проекта, осуществляя планирование и координацию работ других исполнителей (специалиста по маркетингу, патентоведа, экономиста и др.), а также функции непосредственного исполнителя отдельных этапов. При этом менеджер проекта решает общие организационные вопросы, касающиеся всех стадий разработки инновационного продукта.

Помимо функций инновационного менеджера, инновационный инженер в рамках инновационной стадии ЖЦТС выполняет функции исполнителя инженерной части проекта. Основными исполнительскими функциями инновационного инженера в процессе реализации ЖЦТС являются:

- преобразование первичной идеи в инновационный замысел с последующим оформлением инновационного предложения;
- структурно-функциональный и компонентный синтез инновационного продукта;
- разработка, изготовление и испытания прототипа;

разработка и оформление технического задания для дальнейшего продвижения инновационного процесса на этапах стадии технического проекта (стадии конструкторско-технологической разработки).

Авторами ПИ далеко не всегда являются специалисты в области техники, к которой эта идея относится. Во многих случаях идеи по улучшению существующих систем, приборов и устройств или по созданию принципиально новых объектов техники возникают у нетехнических специалистов, которые эти системы используют в своей повседневной работе. Например, первичные идеи в области медицины и медицинской техники чаще всего появляются у медицинских работников, так как именно они в основном сталкиваются с проблемными ситуациями в профессиональной деятельности и вынуждены задумываться о путях их решения.

Одной из основных функций инновационного инженера и других исполнителей инновационной стадии ЖЦТС является преобразование ПИ в инновационный замысел (ИЗ) – концептуальную форму представления ПИ, которая должна содержать необходимое техническое, экономическое, маркетинговое и патентное обоснования.

Значение слова «замысел» происходит от существительного «мышление»: любой замысел является результатом процесса мышления. Другими словами, процесс перевода ПИ в ИЗ предполагает реализацию методов, основанных на использовании различных форм воображения, а также существующего перечня мыслительных операций и способов мышления.

Преобразование (перевод) ПИ в ИЗ включает в себя:

- построение рыночного образа (функциональной модели) изделия, которое необходимо создать на базе предлагаемой первичной идеи;
- анализ и классификацию рыночной потребности в новом изделии в соответствии с ее видом и характером возможного удовлетворения;
- внешнюю системную и рыночную адаптацию функциональной модели будущего изделия, создаваемого на базе первичной идеи;
- формирование инновационного замысла и оформление инновационного предложения.

Инновационный инженер относится к категории специалистов, работа которых относится к высшим формам человеческой деятельности (творческие работники, ученые, инженеры-изобретатели, педагоги, врачи, адвокаты). Процесс подготовки этих специалистов отличается тем, что достижение ими продуктивного (или высокого) квалификационного уровня происходит через 10–12 лет с момента начала учебы в университете. Это связано с тем, что в педагогике профессионального обучения за обозримый исторический период каких-либо существенных методологических прорывов, направленных на сокращение сроков профессионального становления, не произошло. Повседневный процесс при-

обретения индивидуального профессионального опыта является доминирующим для этой категории специалистов.

В отличие от традиционных образовательных методов процесс подготовки инновационных инженеров должен также иметь инновационный характер. Необходима разработка обучающих методов, которые способствуют повышению качественных показателей обучения и сокращению сроков достижения специалистами уровня профессионального мастерства.

Уровень развития образовательных технологий по части технического обеспечения, разнообразия и доступности учебной информации, а также ее мультимедийности за последние годы существенно возрос. Поисковые системы интернета, игровые обучающие и тренинговые программы, виртуальные инструменты и экспериментальные установки стали реальными компонентами общеобразовательных и обучающих технологий.

Однако эти достижения в развитии технических средств обучения не привели к осязаемому прогрессу в области образования. Причиной этого является то, что консервативным элементом системы обучения является сам обучаемый. Если более конкретно, то это свойственные человеку механизмы восприятия, связанное с этим восприятием мышление и последующее ассоциативное запоминание учебной информации.

Необходима разработка дидактических методов, учитывающих психологию восприятия, т. е. возможности студентов воспринимать и эффективно усваивать определенный объем учебной информации за единицу времени. Педагогика, как наука и часть общей системы знания, не является обособленной и невосприимчивой к использованию междисциплинарных моделей или аналогий. Возможность использования в разрабатываемых образовательных методах аналогий и изоморфных явлений других предметных областей является эффективным средством повышения КПД учебного процесса.

Процесс профессиональной подготовки инновационного инженера может быть рассчитан на двухгодичный период. Примерный перечень изучаемых предметов для подготовки специалистов в области технических систем включает в себя целевые адаптированные курсы:

- прикладную математику;
- прикладную физику;
- общую теорию систем и законы развития технических систем;
- развитие творческого мышления и творческого воображения;
- теорию решения изобретательских задач;
- функциональные компоненты технических систем (включая химические и биологические структуры);
- основы программирования и программирование встроенных систем;
- функциональный и компонентный синтез технических систем;
- инструменты и системы компьютерного моделирования и проектирования;

функционально-стоимостный анализ;  
системный инжиниринг;  
инновационный маркетинг;  
инновационный менеджмент;  
патентование.

Базовой основой для профессиональной подготовки инновационных инженеров являются основные личностные качества специалистов. Личностные качества – это вид социально и профессионально значимых качеств, способствующих адаптации и успешности человека в его деятельности и в обществе. По разным оценкам, существует от 30 до 50 различаемых личностных качеств. Значительная часть из них являются социальными, т. е. связанными с поведением человека в социуме. Что же касается профессиональных качеств креативных специалистов, то творческая их составляющая основана на базовых личностных качествах – мотивации, воображении и мышлении.

В методологии научных исследований выделяют такие теоретические методы, как анализ, синтез, обобщение, сравнение, классификацию (систематизацию), абстрагирование, конкретизацию. С их помощью осуществляется изучение той или иной стоящей перед человеком проблемы, рассматриваются свойства составляющих эту проблему элементов, их взаимосвязь и характер противоречий. Решение задач, развивающих профессионально ориентированное мышление, является одним из аспектов подготовки инновационных инженеров.

Желание, как конкретизированная потребность, является побуждением к действию, или мотивацией, – важным и первичным фактором в появлении инновационных идей. Человек, озадаченный конкретной проблемой, становится прагматиком в поиске, усвоении и интерпретации всей получаемой информации в проекции на искомое решение. Мотивация и настойчивость в решении проблемы являются существенной составляющей успеха. В отношении к любому виду деятельности мотивация имеет внутреннюю и внешнюю составляющие.

Внутренняя (интринсивная) мотивация обусловлена содержанием конкретной деятельности. Субъекту мотивации нравится сам процесс и характер этой деятельности. В значительной степени это связано с его способностями к конкретной деятельности и устойчивыми положительными результатами выполняемой работы.

Внешняя (экстринсивная) мотивация связана с влияющими на нее факторами, находящимися вне конкретной деятельности субъекта мотивации. К таким факторам относится материальная заинтересованность, высокие социальные притязания и т. п.

В случае доминирования экстринсивных мотивов привлекательна не деятельность сама по себе, а только то, что связано с ней (например, прес-

тиж, слава, материальное благополучие), а этого часто бывает недостаточно для побуждения к эффективной творческой деятельности.

Если в процессе деятельности, связанной с непосредственным созданием инноваций, экстринсивные мотивы не будут подкреплены процессуально-содержательными, т. е. интересом к содержанию и процессу деятельности, то они не обеспечат максимального творческого эффекта. Отсюда значимость профессиональной ориентации и профессионального отбора для творческих видов деятельности. Вместе с тем обеспечивающие уровни инновационного процесса (государственный, региональный, отраслевой, муниципальный и фирменный) должны создавать условия внешней мотивации для творческих и продуктивных исполнителей инновационных разработок.

Вторым по значимости фактором, благодаря которому появляются инновационные идеи, является воображение – способность сознания создавать образы, представления, идеи и манипулировать ими. Воображение играет ключевую роль в таких психических процессах, как моделирование, планирование, творчество, игры, человеческая память. В широком смысле всякий процесс, протекающий «в образах», является воображением. Разновидностью творческого воображения является способность к выдвижению научной гипотезы, с помощью которой осуществляется процесс прогнозирования этапов будущей деятельности и ее результатов.

Творческое мышление является третьим по значимости личностным качеством инновационного инженера. В его базисной основе находится творческое воображение. В отличие от наглядно-образного, наглядно-действенного и словесно-логического мышления, обеспечивающих оценку и анализ реально наблюдаемых и воспринимаемых объектов и событий, творческое мышление оперирует виртуальными объектами. Оно требует способности удерживать в воображении множество предметов, образов и взаимосвязей между ними. При этом данная синтезированная изначально в статике система подвергается различного рода комбинаторным или целенаправленным структурно-функциональным изменениям до достижения приемлемого результата. Творческое мышление является осуществляемым в воображении процессом мысленных манипуляций с проектируемой системой в статике и динамике, в пространстве и во времени, в подсистемах и в надсистеме с использованием известных операций и способов мышления.

## TO THE ISSUE OF TRAINING INNOVATIVE ENGINEERS – INNOVATION MANAGERS

**Belov V.V.**

***Abstract.** The main tool for improving the quality of education at a technical university is the innovative activity of teachers, students and employees related to the development of popular projects in the field of modernization of industrial enterprises and the training of competitive engineering personnel for them. It is shown that the quality of innovations, the main developer of which is a specialist of an innovative type, prepared at a technical university, is a criterion of his personal qualities, the level of professional training, and in the future, the accumulated work experience.*

***Keywords:** innovative activity, higher professional education, specialist of innovative type, quality of education.*

Об авторе:

БЕЛОВ Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

About the author:

BELOV Vladimir Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

УДК 666.970

### СУХИЕ СМЕСИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ

**Белов В.В., Курятников Ю.Ю.**

© Белов В.В., Курятников Ю.Ю., 2021

***Аннотация.** Сформулированы и научно обоснованы требования к составу сухой смеси с позиции формирования структуры газобетона. Представлены количественные взаимосвязи между компонентным составом сухой золосодержащей смеси, структурой и физико-механическими*

*свойствами газобетона. На основе разработанной методики определения косвенного показателя реологических свойств газобетонной смеси установлено влияние длительности перемешивания газобетонной смеси на структуру и свойства газобетона естественного твердения. Обоснована возможность использования отработанного текстильного корда в качестве дисперсно-армирующей добавки и установлено его положительное влияние на структурообразование и эксплуатационные свойства газобетона неавтоклавного твердения на основе сухой золосодержащей смеси. Изложены технологические особенности производства сухой смеси и неавтоклавного газобетона на ее основе.*

**Ключевые слова:** *состав сухой золосодержащей смеси газобетона, количественные взаимосвязи между компонентами, структура газобетона, физико-механические свойства газобетона.*

Строительство современного жилья предполагает использование новых строительных технологий, возведение строительных конструкций с применением разнообразных эффективных строительных материалов, влияющих на долговечность сооружений и комфортность жилья. По установленной за рубежом градации комфортного проживания человека первое место занимают дома из дерева, второе – дома из ячеистых бетонов (поробетонов). Рынок неавтоклавных поробетонов в России абсолютно нестабилен в вопросах качества, так как многие производители пользуются сомнительными технологиями и оборудованием. В настоящее время появилась настоятельная необходимость производства качественного неавтоклавного поробетона как для монолитного строительства, так и для изготовления штучных изделий. Этого можно достичь за счет получения поробетона из нового класса сухих строительных смесей – сухих поробетонных смесей (СПБС), которые будут обладать такими присущими сухим строительным смесям достоинствами, как удобный способ доставки и хранения сухих смесей на объекте; повышенное качество строительных работ; сокращение потерь и транспортных расходов; полная заводская готовность; возможность транспортирования и хранения при отрицательных температурах и т. д. Сухая поробетонная смесь готовится в виде состава, который достаточно перемешать с необходимым количеством жидкого компонента и залить в форму или на изолируемый участок, чтобы быстро получить поробетон высокого качества.

Анализ современной научно-технической литературы по вопросам формирования макро- и микроструктуры ячеистых бетонов позволяет определить основные информационные логические связи при проектировании составов сухих смесей для изготовления газобетона (рис. 1). Предлагаемая модель, реализующая комплексный подход, позволяет установить взаимосвязь между физико-химическими предпосылками формирования структуры газобетона, структурообразованием и свойствами мате-

риала. Формирование микро- и макроструктуры газобетона осуществляется за счет варьирования основных компонентов состава сухой смеси, модификации состава химическими и дисперсно-армирующими добавками, природы поверхности, дисперсности и однородности распределения компонентов, механоактивации поверхности твердой фазы и рациональных режимов перемешивания газобетонной смеси. В свою очередь, структура определяет основные свойства газобетона: среднюю плотность, предел прочности на сжатие и на растяжение при изгибе, усадку при высыхании, теплопроводность.

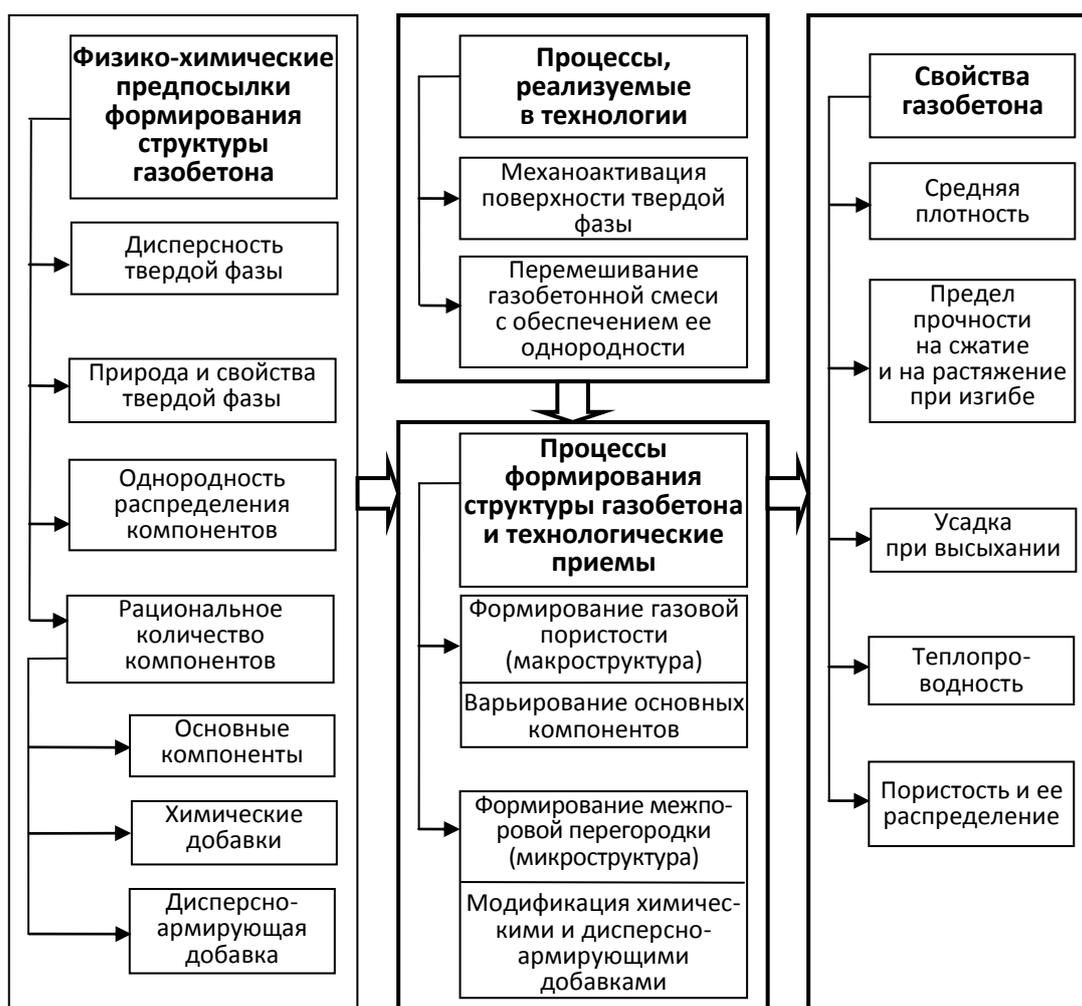


Рис. 1. Схема информационных логических связей при формировании структуры газобетона из предварительно приготовленной сухой смеси

В опубликованных работах показано, что достичь высоких технических характеристик газобетона можно за счет применения рационально подобранных вяжущих, модификации смесей активными тонкодисперсными наполнителями, введением различных дисперсно-армирующих волокон и современных химических добавок. В качестве компонентов сухих

смесей для изготовления газобетона эффективно применять минеральные однородные материалы соответствующей дисперсности, обладающие высокой поверхностной активностью и энергией взаимодействия в водной среде, выделяющие большое количество тепла и уплотняющие структуру межпоровой перегородки газобетона.

Достигнуть более полного использования потенциала вяжущего возможно за счет его наполнения активными минеральными структурообразующими добавками, способными уже в период поризации смеси образовывать или генерировать высокодисперсную твердую фазу, которая, располагаясь между зернами цемента, значительно сокращает величину начального свободного порового пространства в межпоровой перегородке. При этом происходит модификация микроструктуры межпоровых перегородок газобетона, способствующая их упрочнению. Доказана эффективность применения микрокремнезема, пылевидных отходов камнепиления, тонкодисперсных карбонатных наполнителей и полуводного гипса. Показаны предпосылки эффективного применения нанодисперсных частиц для газобетонов, однако эта область до сих пор остается малоизученной.

Расширение сырьевой базы за счет применения зол и шлаков теплоэлектростанций (ТЭС) является важной проблемой в технологии ячеистых бетонов, ее изучению посвящены многочисленные работы, в которых отмечается, что золы и шлаки имеют существенный недостаток – широкий разброс состава и свойств. Для устранения деструктивных явлений при твердении зол и шлаков, а также для ускорения темпов набора прочности газобетонов эффективно применять добавки натриевых солей.

Неавтоклавные газобетоны характеризуются нестабильной ячеистой структурой, низкими эксплуатационными свойствами и большой влажностной усадкой. Одним из рациональных способов решения данной проблемы является фиброармирование газобетона волокнистыми добавками [1]. Введение дисперсных волокон (синтетических, минеральных, древесных) в оптимальном количестве существенно улучшает качество ячеистых бетонов, в том числе их прочность и долговечность [2].

Достигнуть более полного использования потенциала вяжущего в СПБС возможно за счет его наполнения минеральными структурообразующими добавками. Причины увеличения прочности межпоровых перегородок поробетона связаны с модификацией его микроструктуры. Использование заполнителей из вторичных ресурсов (зол, шлаков и др.), хотя и имеющих повышенную поверхностную активность по сравнению с песком, но меньшую, чем у цемента, по мнению некоторых авторов, недостаточно эффективно из-за нестабильности их свойств. Для нормализации процесса газообразования и получения быстровспучивающегося газобетона из СПБС, содержащей в своем составе золу ТЭС, последнюю домалывают до тонкодисперсного состояния совместно с другими компонентами смеси [3].

Решение о целесообразности и эффективности производства вспучивающихся сухих смесей для получения неавтоклавных зольных ячеистых бетонов на основе отвальной золы ТЭС по сравнению с традиционным неавтоклавным ячеистым бетоном на молотом песке должно основываться на сравнении затрат по использованию этих материалов в строительных изделиях и конструкциях, например стеновых камнях конструкционно-теплоизоляционного назначения и утеплителях плит. Расчеты показывают, что в результате разработки технологии производства СПБС для получения неавтоклавных зольных ячеистых бетонов на основе отвальной золы ТЭС снижение себестоимости продукции за счет эффективного использования сырья составляет в среднем 20 %. При этом достигается сокращение расхода цемента до 30 %. За счет уменьшения материалоемкости строительных конструкций и энергозатрат на их производство общее снижение затрат на изготовление зольных ячеистых бетонов из СПБС по сравнению с аналогичными материалами составит не менее 30–35 %. За счет использования в качестве основного сырья отвальной золы ТЭС достигаются дополнительные энергосберегающий и экологический эффекты.

При разработке компонентного состава СПБС для поробетона особое внимание следует уделять выбору вяжущего вещества. Из литературных источников известно, что при использовании цементов с повышенным содержанием алита и трехкальциевого алюмината можно получить поробетон с максимальной прочностью и минимальными усадочными деформациями. Использование шлакопортландцемента и пуццоланового портландцемента приводит к снижению прочности поробетона, ухудшает его воздухоустойкость и увеличивает усадочные деформации. Высокая активность вяжущего связана с его дисперсностью прямо пропорциональной зависимостью. В работе [4] предложена сухая смесь «Аэромикс» для получения поробетона средней плотности 400–600 кг/м<sup>3</sup> следующего состава: портландцемент М500-Д0 – 70 %; цемент тонкомолотый (размер частиц до 5 мкм) – 20–30 % от массы вяжущего; песок кварцевый речной тонкомолотый (размер частиц до 40 мкм) – 30 % от массы вяжущего; мел нейтральный тонкомолотый; нерастворимый в воде кристаллизатор-загуститель СТ-1; ускоритель схватывания смеси.

В последнее время многие ученые проявляют интерес к использованию силиката натрия в качестве вяжущего в технологии поробетонов. Наиболее распространенный способ использования силиката натрия в качестве связующего для поробетона – в жидком состоянии. В этом случае СПБС может готовиться в виде состава из твердых компонентов, который заливается необходимым количеством растворимого стекла на стадии затворения. К таким материалам относится теплоизоляционный материал «Эволит-термо» [5], который можно получить в виде готовых изделий или заливочной самовспенивающейся массы, приготавливаемой на объекте из СПБС и растворимого стекла. «Эволит-термо» обладает средней плот-

ностью 180–450 кг/м<sup>3</sup>, прочностью на сжатие 0,25–1,3 МПа, водопоглощением за 24 ч не более 7 %, коэффициентом теплопроводности при 25±5 °С 0,048–0,09 Вт/м·°С.

Сегодня невозможно получить качественную сухую строительную смесь, в частности СПБС, для поробетона без использования современных модифицирующих химических добавок: ускорителей твердения и гидратации, пластификаторов, противоморозных и др. Для ускорения темпов набора прочности поробетонеров наибольшее распространение получили добавки натриевых солей. Недостаточно изучен вопрос о влиянии порошковых полимерных добавок, а также пластификатора С-3 на газообразование смеси.

Самым распространенным «сухим», что важно для изготовления СПБС, газообразователем при изготовлении поробетона является алюминиевая пудра. Газообразующая способность алюминиевой пудры резко возрастает при использовании фракций от 40 мкм и менее. Этому условию соответствует пудра марок ПАП-1, ПАП-2. Для обеспечения эффективного порообразования важнейшей задачей является удаление пленок с поверхности газообразователя. Чтобы удалить жировую пленку, пудру обрабатывают поверхностно-активными веществами, прокаливают в электрических печах. Ускорить порообразование можно за счет домола порообразователя до тонкодисперсного состояния. В процессе домола пудры также происходит ее частичная депарафинизация [3].

В работе [6] был апробирован способ обработки пудры, при котором газообразователь размалывается вместе с сухим кварцевым песком и добавкой ацетоформальдегидной смолы АЦФ-3М. При этом с поверхности пудры удаляются оксидная и парафиновая пленки. При размалывании кварца происходит разрыв связей и образование свободных радикалов на его поверхности, жизнеспособность которых в обычных условиях ограничена, поэтому кварц быстро теряет активность. При измельчении кварца в среде реакционноспособного органического соединения (ацетоформальдегидной смолы) полимер, химически адсорбируясь на поверхности кварца, «приклеивает» мельчайшие частички пудры к поверхности песчинок. При этом предотвращается процесс всплывания пудры, достигается высокая гомогенность смеси.

Интенсифицировать процесс газообразования можно за счет введения в поризованную смесь химических добавок. Например, добавка хлористого кальция CaCl<sub>2</sub> интенсифицирует реакцию газовыделения, так как ионы хлора в щелочной среде активизируют процесс растворения алюминия благодаря их адсорбции на окисленной поверхности частиц и замещению в ней ионов кислорода. Это явление способствует растворению пассивирующих пленок на частицах алюминия в присутствии гидроксильных ионов. Вероятно, и другие хлорсодержащие соли (NaCl, KCl) способны растворять пленки на частицах алюминия.

Установлено [7], что углеродные частицы несгоревшего топлива, содержащиеся в золе ТЭС, образуют с частицами алюминия множество гальванических пар микроэлектродов (микроэлементов), находящихся в контакте с электролитом – жидкой фазой смеси. Вследствие возникающих в системе электродвижущих сил происходит ускорение и углубление реакции между алюминиевой пудрой и гидроокисью кальция, интенсифицируются другие химические и физико-химические процессы. При этом время газовыделения сокращается в 2–2,5 раза, на 5–8 % увеличивается конечное приращение объема смеси.

В смесях, поризованных пенообразователем (ПО), устойчивость и связность обеспечиваются при равновесии капиллярного и расклинивающего давлений пленочной воды в зонах капиллярных менисков, а также силами поверхностного натяжения. Поэтому для повышения устойчивости воздушных ячеек целесообразно использовать стабилизаторы в виде высокодисперсных минеральных компонентов, а также применять ускоритель схватывания цементной системы. Высокодисперсные частицы «бронируют» воздушные ячейки твердой фазы. Однако все исходные компоненты смеси в этом случае должны быть сухими, а для производства пенобетона в основном применяются концентрированные водные растворы ПО. Перевод их в сухое состояние возможен двумя основными способами [8]:

1) сорбционным (путем смешения с порошкообразным или гранулированным пористым сорбентом – потенциально полезным функциональным компонентом в пенобетоне);

2) химическим (гидратационным) – путем смешивания ПО с минеральными веществами, способными к реакции гидратации, например с оксидом кальция, полуводным гипсом и др.

Для двух способов получения сухого ПО определяли оптимальные соотношения концентрированного ПО с сорбентом и гидратирующимися веществами. В первом случае полученную смесь сушили при температуре 100–105 °С до постоянной массы, а во втором после завершения реакции гидратации полученный твердый продукт подвергали помолу. Приготовление СПБС заключалось в совместном интенсивном перемешивании составляющих (цемента, сухого ПО и при необходимости заполнителя). Прочность пенобетона D400, приготовленного из сухой смеси первого типа (сорбционный способ перевода жидкого ПО в сухое состояние), выше контрольного во все сроки твердения. При этом добавка сухой смеси анионного поверхностно-активного вещества дает значительный прирост прочности по сравнению и с контрольным, и с бездобавочными составами. Следует отметить, что все пенобетоны, полученные из сухой пенобетонной смеси, отличаются меньшей усадкой в 28-суточном возрасте. Сравнение прочности пенобетона, полученного из сухих смесей второго типа (гидратационный перевод жидкого пенообразователя ПО-6 в сухое состояние),

с пенобетоном первого типа и контрольным показывает, что пенобетоны из СПБС второго типа превосходят по прочности контрольный состав, однако существенно уступают пенобетону из СПБС первого типа. Существенную роль играет химическая природа носителя ПО (сорбента и кристаллогидрата) – это является предметом дальнейших исследований, однако преимущества в прочностных свойствах пенобетона, полученного из сухой смеси, очевидны [8].

Минеральные вспучивающиеся сухие смеси-легковесы могут быть использованы для заделки рабочих швов, узлов, пустот и раковин в стеновых и теплоизоляционных изделиях и конструкциях без образования «мостиков холода» и обеспечивать монолитность конструкции. Результаты работы позволяют совместить наилучшие стороны газобетонной технологии и технологии сухих строительных смесей, а также с учетом использования комплекса химических добавок усовершенствовать технологию производства неавтоклавного газозобетона с целью получения необходимых для строительства высокоэффективных строительных материалов. Полученные материалы отличаются достаточными физико-механическими показателями, экологической безопасностью, малой энергоемкостью и стоимостью.

Сухие строительные смеси стали неотъемлемой частью современного строительства благодаря их высокой эффективности. Целесообразность использования сухих строительных смесей, как материала полной заводской готовности, подтверждена зарубежной и отечественной практиками строительства. Широкая номенклатура сухих строительных смесей позволяет выполнять различные виды строительных работ: кладочные, гидроизоляционные, теплоизоляционные и т. д. Для теплоизоляционных работ номенклатура сухих смесей ограничивается отделочными и выравнивающими составами с пониженной плотностью, а также составами для приклейки теплоизоляционных материалов.

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время ведутся разработки составов сухих смесей для получения ячеистых бетонов. В.М. Селиванов [3] разработал составы сухих газобетонных смесей на основе смешанных бесклинкерных вяжущих, содержащих в своем составе высококальциевую золу ТЭС и вскрышные глинистые породы, а также малоклинкерное смешанное вяжущее, содержащее добавку портландцемента. В результате получен газобетон средней плотностью 170–205 кг/м<sup>3</sup> прочностью на сжатие 0,06–0,11 МПа. Установлено, что при сроке хранения до трех месяцев кратность вспучивания смеси не изменяется. Ю.В. Щукиной [9] было изучено влияние технологии изготовления золосодержащих сухих смесей для производства неавтоклавного газобетона. Эти смеси изготавливались следующим образом:

- 1) сырьевые компоненты (высокоосновную золу, кварцевый песок и портландцемент) в различных соотношениях просто перемешивали;

2) портландцемент и высокоосновную золу подвергали совместному помолу в шаровой мельнице;

3) часть молотой смеси портландцемента и высокоосновной золы заменяли немолотым кварцевым песком.

При простом перемешивании сырьевых компонентов средняя плотность газобетона составила  $700 \text{ кг/м}^3$ , а предел прочности при сжатии 2,5 МПа. Помол предложенных составов приводит к повышению прочности при сжатии в среднем на 35 % в результате увеличения удельной поверхности и активности вяжущего. Установлено, что введение 10–20 % кварцевого песка в молотую золоцементную смесь позволяет получить газобетон плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$  и прочностью при сжатии 2,76–3,02 МПа. Таким образом, физико-механические свойства неавтоклавного газобетона, полученного из сухой смеси, соответствуют нормативным требованиям.

В.А. Кузнецовым и Ю.М. Шершневым [4] разработана сухая смесь для получения поробетона средней плотности  $400\text{--}600 \text{ кг/м}^3$ , состоящая из тонкомолотого цемента (размер частиц до 5 мкм), портландцемента М500-Д0, нейтрального тонкомолотого мела, кварцевого речного тонкомолотого песка (размер частиц до 40 мкм), нерастворимого в воде кристаллизатора-загустителя СТ-1; ускорителя схватывания смеси.

В работах В.Д. Черкасова [10, 11] была показана возможность получения сухих смесей для производства пенобетонов с применением пенообразующей добавки белковой природы. Определены рецептурно-технологические параметры получения сухих смесей, а также изучены деформативные свойства неавтоклавного пенобетона. Была определена оптимальная концентрация твердого ПО в составе сухой смеси, которая составила не более 2 % от массы цемента, а также подобраны модифицирующие добавки. Выявлено, что эффективным ускорителем твердения в составе сухих смесей является силикат натрия. Усадка и морозостойкость пенобетона средней плотностью  $400\text{--}800 \text{ кг/м}^3$  соответствует нормативным требованиям ГОСТ 25485-89.

Нами проведены экспериментальные исследования, в которых определялось влияние способа изготовления газобетона и режимов перемешивания газобетонной смеси на его структуру и физико-механические свойства. Газобетон изготавливали следующими способами:

1) традиционным на основе кварцевого песка (согласно СН 277-80). При этом для получения сырьевой смеси перемешивали все компоненты (портландцемент, кварцевый песок, модифицирующие добавки, алюминиевую суспензию и воду);

2) традиционным на основе золы гидроудаления ТЭС;

3) на основе предварительно приготовленной сухой готовой смеси (СГС). При этом производили совместный помол всех сухих компонентов (портландцемента, золы гидроудаления ТЭС, модифицирующих добавок и алюминиевой пудры) в шаровой мельнице. Затем СГС перемешивали с водой затворения;

4) на основе предварительно приготовленной сухой смеси заполнителя и добавок (ССЗД). При этом производили совместный помол сухих компонентов (золы гидроудаления ТЭС, модифицирующих добавок и алюминиевой пудры) в шаровой мельнице, за исключением портландцемента. Затем ССЗД перемешивали с портландцементом и водой затворения.

Сухие компоненты или предварительно приготовленную смесь перемешивали с подогретой водой с помощью лабораторной мешалки при 180–200 об/мин в течение 2 мин. После этого вливали рассчитанное количество алюминиевой суспензии, перемешивание продолжалось еще 30 с. Затем сырьевую смесь заливали в предварительно подогретые формы-тройчатки 10×10×10 см. Сразу после заливки контролировали температуру смеси в пределах 45–48 °С. Вспучивание смеси заканчивалось через 20–30 мин. Через 3 ч после заливки смеси в форму срезали «горбушку» металлической струной. Образцы покрывали полиэтиленовой пленкой и выдерживали до момента испытаний при температуре 20±2 °С.

Физико-механические свойства образцов определяли согласно стандартам ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 12730.1-78 «Бетоны. Методы определения плотности», ГОСТ 12730.2-78 «Бетоны. Метод определения влажности». Физико-механические свойства газобетона в зависимости от способа изготовления представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства газобетона,  
полученного разными способами

Способ изготовления газобетона	В/Т	Свойства	
		Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на сжатие в возрасте 7 суток, МПа
Традиционный (на основе кварцевого песка)	0,59	605	0,59
Традиционный (на основе золы гидроудаления ТЭС)	0,60	573	0,61
На основе предварительно приготовленной СГС	0,64	515	0,70
На основе предварительно приготовленной ССЗД	0,61	488	0,64

Примечание. В/Т – водотвердое отношение.

Сравнение качественных показателей газобетона, полученного разными способами, показало, что минимальный предел прочности на сжатие наблюдается у образцов, полученных традиционным способом на основе кварцевого песка (способ № 1), а максимальный у образцов, полученных на основе предварительно приготовленной СГС (способ № 3). Высокая прочность в способе № 3 достигается главным образом за счет механи-

ческой активации портландцемента и золы при помоле в шаровой мельнице. Средняя плотность газобетона, полученного на основе предварительно приготовленных сухих смесей, меньше, чем полученного традиционными способами. Этот факт объясняется повышением коэффициента использования алюминиевой пудры за счет увеличения ее дисперсности и обеспарафинизацией при механической обработке. Наиболее рациональным является способ № 4 (на основе предварительно приготовленной ССЗД). При этом газобетон имеет минимальную среднюю плотность и достаточную прочность. За счет исключения помола такого дисперсного компонента, как портландцемент, увеличивается производительность мельницы, уменьшаются энергозатраты на помол и уменьшается себестоимость газобетона.

Перемешивание бетонной смеси является важной технологической операцией, в процессе которой формируется начальная структура материала. В процессе перемешивания материалы равномерно распределяются по всему объему смеси, в результате чего получается однородная масса, свойства которой в любом месте объема должны быть одинаковы. С однородностью бетонной смеси тесно связаны основные физико-механические свойства бетона.

Большое влияние на качество перемешивания оказывает его продолжительность, при недостаточной ухудшается однородность бетона и понижается его прочность. Оптимальная продолжительность перемешивания зависит от состава, характеристики бетонной смеси и типа применяемого смесителя. Согласно СН 277-80 «Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона», сначала в течение 2 мин перемешивают все основные компоненты смеси, а затем в смеситель подают заданное количество водной суспензии алюминиевой пудры и смесь перемешивают еще 1–2 мин, т. е. общее время перемешивания составляет 3–4 мин. В то же время Г.П. Сахаровым [12] установлено, что при перемешивании газобетонной смеси в течение 7 мин при использовании холодной воды затворения, газобетон обладает однородной структурой и высокой прочностью. Газобетон, изготовленный по данному режиму, имел коэффициенты вариации по прочности 3–5 % и средней плотности 1,5–2 %.

К.В. Гладких [13] разработал способ изготовления газобетона на основе высококальциевых шлаков и зол с удлиненным режимом перемешивания газобетонной смеси до 10–15 мин, т. е. до окончания процесса вспучивания. При этом наблюдалось увеличение прочностных характеристик газобетона на 50–70 % за счет повышения дисперсности шлаков и зол и их активизации. Для развития данной технологии нами были проведены исследования по определению оптимальной продолжительности перемешивания газобетонной смеси.

Процесс перемешивания газобетонной смеси осуществляли с помощью смесителя собственной конструкции, который позволяет определять консистенцию смеси при ее перемешивании. Консистенцию газобетонной смеси характеризовали с помощью косвенного показателя – силы тока потребляемого электродвигателем смесителя. По мере загрузки сухих компонентов в смеситель наблюдается существенное увеличение силы тока, первый экстремум которой наблюдается через 1 мин, что обусловлено повышением вязкости системы (рис. 2).

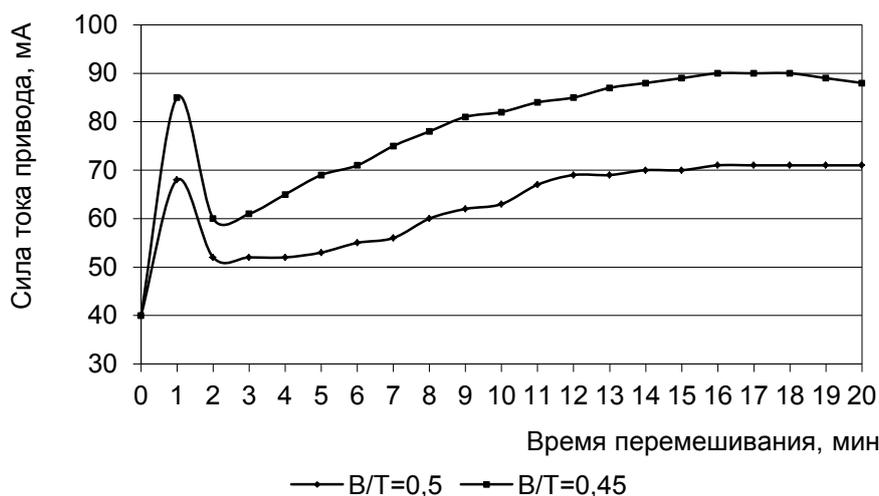


Рис. 2. Зависимость силы тока от времени перемешивания газобетонной смеси

Далее по мере гомогенизации смеси сила тока уменьшается и через 2 мин после начала перемешивания она достигает минимума, что является признаком достижения однородности смеси. Через 3–5 мин после начала перемешивания сила тока вновь начинает расти, что свидетельствует о насыщении смеси газообразной дисперсной фазой и увеличении ее вязкости при этом. Через 15–16 мин сила тока достигает максимума, следовательно, процесс вспучивания закончился. Потребляемая мощность смесителя растет пропорционально увеличению суммарной площади раздела фаз и стабилизируется, когда заканчивается процесс газообразования. С увеличением жидкой фазы понижается вязкость смеси и потребляемая мощность падает.

При перемешивании смеси до 6 мин свойства газобетона практически остаются постоянными (рис. 3, 4). При перемешивании более 6 мин средняя плотность, предел прочности на сжатие и коэффициент конструктивного качества газобетона увеличиваются. Максимальное значение коэффициента конструктивного качества, равное 2,58, соответствует 14 мин перемешивания, далее его рост прекращается. Коэффициент конструктивного качества увеличился на 16 % по сравнению с первоначальным значением при перемешивании смеси в течение 2 мин.



Рис. 3. Зависимость средней плотности газобетона от времени перемешивания



Рис. 4. Зависимость коэффициента конструктивного качества газобетона от времени перемешивания

Повышение средней плотности газобетона происходит в результате частичного выхода газовых пузырьков через поверхность наружу в результате механических воздействий на смесь. Повышение прочности и коэффициента конструктивного качества происходит в результате механической активации цемента и золы при перемешивании смеси, а также за счет улучшения макро- и микроструктуры газобетона. При перемешивании более 10 мин образуется однородная мелкопористая структура с плотными межпоровыми перегородками. Поры имеют правильную преимущественно овальную форму с размерами от 0,3 до 0,7 мм. Газобетон, перемешивание которого происходило в течение 3–4 мин, характеризуется неоднородной

пористой структурой с размерами пор от 0,5 до 1,5 мм. Поры преимущественно имеют неправильную форму и перфорированные перегородки.

В практическом плане данная технология позволяет получать неавтоклавный газобетон на основе предварительно приготовленной сухой смеси, не требующий срезки «горбушки», с малодефектной мелкопористой структурой, что позволяет применять его в монолитном строительстве для заполнения многослойных ограждающих конструкций и утепления межэтажных перекрытий.

Газобетоны неавтоклавного твердения имеют существенные недостатки: повышенную усадку в процессе эксплуатации (3 мм/м и более), малую трещиностойкость и ударную прочность по сравнению с автоклавными при одинаковой средней плотности изделий. Это связано с низкой степенью гидратации цемента, содержание которого в составе минеральной части сырьевой смеси может составлять 50 % и более. Для повышения качественных показателей необходимо использовать вещества с повышенной поверхностной активностью, а также волокнистые добавки различного происхождения. Значительный интерес представляют синтетические волокна, которые являются отходами промышленного производства, в частности текстильный корд, получаемый при переработке старых шин [14].

В России ежегодно образуется 870 тыс. т отработанных шин, это число постоянно растет в связи со стремительной автомобилизацией нашей страны. В подавляющем большинстве российских регионов утилизация автопокрышек – одна из самых актуальных экологических проблем. В то же время шины представляют собой ценное сырье: в 1 т шин содержится около 700 кг резины и большое количество металлического и текстильного корда, которые могут быть повторно использованы, в том числе для производства материалов строительного назначения. Основной проблемой в данном случае является применение отработанного текстильного корда, загрязненного резиновой крошкой. Эта проблема до сих пор не решена и является актуальной.

Целью данной работы являлось исследование структуры и свойств газобетона на основе предварительно приготовленной сухой смеси, содержащей в своем составе все необходимые компоненты, в том числе добавку отработанного текстильного корда.

В первоначальном виде отработанный текстильный корд представляет спутавшиеся между собой волокна в виде более или менее крупных комков с содержанием резиновой крошки диаметром до 1 мм в количестве до 15 % по массе. С помощью микроскопического анализа установлено, что волокна отработанного текстильного корда длиной 5–7 мм и диаметром 30–60 мкм в сечении имеют круглую форму и преимущественно гладкую ровную поверхность (рис. 5).



Рис. 5. Текстильный корд ( $\times 100$ )

Анализ потенциальной пригодности волокон отработанного корда для использования в качестве дисперсно-армирующего компонента неавтоклавного газобетона по литературным данным о физико-механических свойствах полимеров, входящих в состав корда, показал, что модуль упругости этих волокон на порядок выше, чем у газобетона, что способствует повышению прочности материала на сжатие и изгиб при действии статических нагрузок [14]. Также возможно увеличение показателей трещиностойкости, усадки при высыхании и морозостойкости газобетона.

Отработанный текстильный корд является несыпучим материалом, поэтому равномерно распределить его в объеме смеси путем обычного перемешивания не представляется возможным. При этом волокна образуют в бетонной смеси «ежи», что резко ухудшает эффективность перемешивания. Для разделения волокон осуществляли их обработку в лабораторной шаровой мельнице. Однако при такой операции без абразива отработанный текстильный корд еще больше комковался, поэтому в дальнейшем его обработку осуществляли совместно со специально подобранным наполнителем, являющимся, как и отработанный корд, техногенным отходом. В исследованиях разработана методика выполнения данной операции и определена максимальная концентрация волокон, при которых последние равномерно распределяются в объеме смеси. При неправильном выполнении операции приготовления сырьевой смеси с волокнами и чрезмерном насыщении ее фиброй происходит образование комков волокон, что может привести к разрыву и укрупнению пор, а также оказать отрицательное влияние на вспучивание газобетонной смеси.

Установлено, что введение текстильного корда увеличивает значения реологических характеристик непоризованной модельной сырьевой смеси (без газообразователя). При введении волокон от 0,5 до 2,5 % расплыв такой смеси по Суттарду уменьшался от 34 до 26 см. Реологические харак-

теристики (предельное напряжение сдвига и вязкость модельной смеси) определяли с помощью пенетрационного реометра ПРБ-2 оригинальной конструкции [15]. На модельной смеси установлено, что введение волокон увеличивает предельное напряжение сдвига смеси в начальный период, это способствует повышению устойчивости газобетонной смеси в период вспучивания (рис. 6).

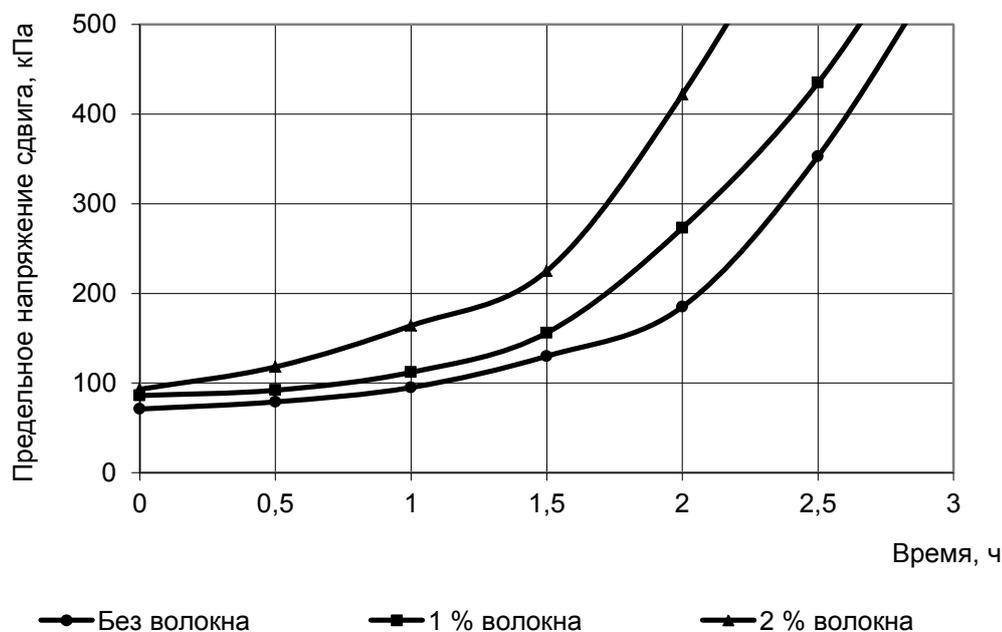


Рис. 6. Зависимость предельного напряжения сдвига модельной смеси от времени твердения при разном содержании текстильного корда

Выявлено, что до 2 % по массе текстильного корда картина вспучивания сырьевой смеси с газообразователем, по сравнению с такой же смесью, но без добавки корда, существенно не меняется (рис. 7).

Максимальный объем, приобретенный смесью в процессе вспучивания, во всех случаях остается постоянным. Скорость вспучивания смеси с волокнами немного выше, чем у контрольной смеси. С повышением процента армирования более 2 % скорость вспучивания и объем газобетонной смеси уменьшаются. Это происходит в результате перенасыщения пространственного каркаса, образованного волокнами, что препятствует росту газовых пузырьков. В газобетонных смесях без волокон в ряде экспериментов наблюдалось расслоение и осадка смеси. При введении текстильного корда до 2 % этих явлений не наблюдалось. Причем в смесях с содержанием корда 2,5 % наблюдалось образование пустот в результате комкования избыточного количества волокон [16].

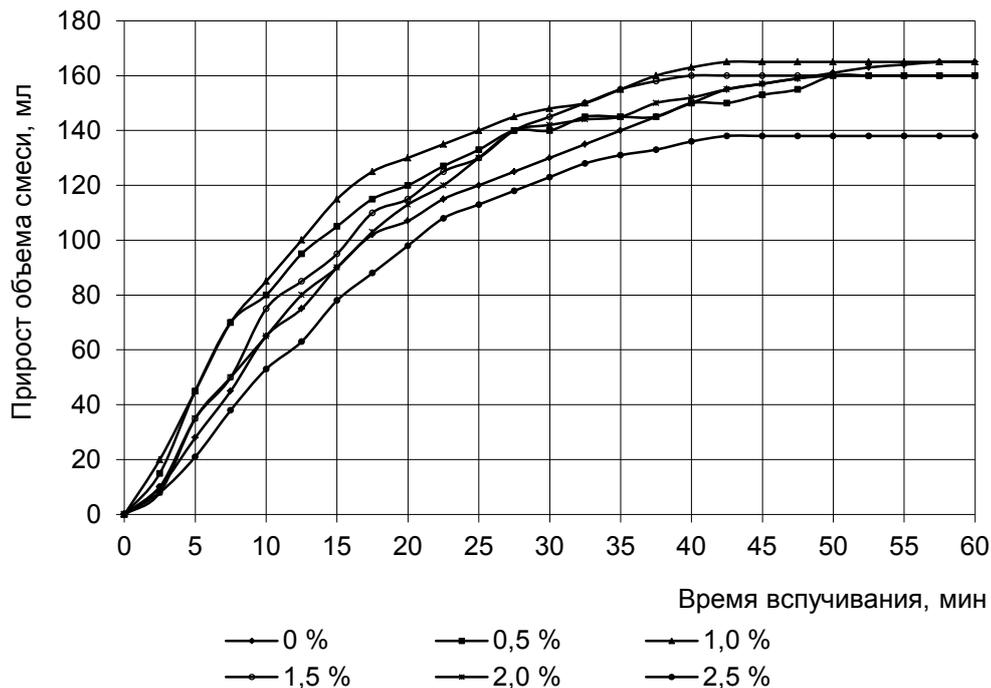


Рис. 7. Зависимость прироста объема смеси от времени вспучивания при разном содержании текстильного корда

На первых этапах работы было установлено, что резиновая крошка диаметром 0,5–1,0 мм, которая обычно содержится в корде, извлеченном из старых покрышек, деформирует межпоровые перегородки газобетона, снижает его прочность и увеличивает водопоглощение. Для устранения нежелательных резиновых включений и коротких волокон отработанный текстильный корд пропускали через сито № 5,0. В результате основная часть (до 95 %) волокон остается на сите, а резиновая крошка и волокна менее 5 мм просеиваются. При этом после просеивания на волокнах корда остается небольшая часть резиновой крошки диаметром менее 0,1 мм, которая не только не оказывает негативного влияния, а даже способствует улучшению реологических свойств смеси (эффект «шарикоподшипника»).

При такой технологии с увеличением содержания корда вплоть до 2 % предел прочности газобетона на сжатие повышается, а средняя плотность практически остается неизменной или даже немного понижается (рис. 8) [17].

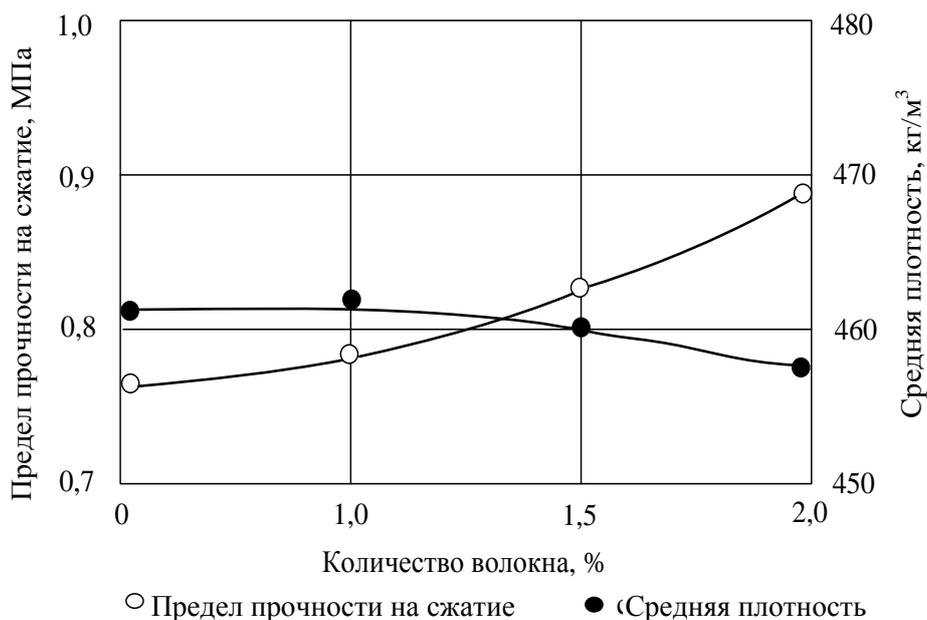


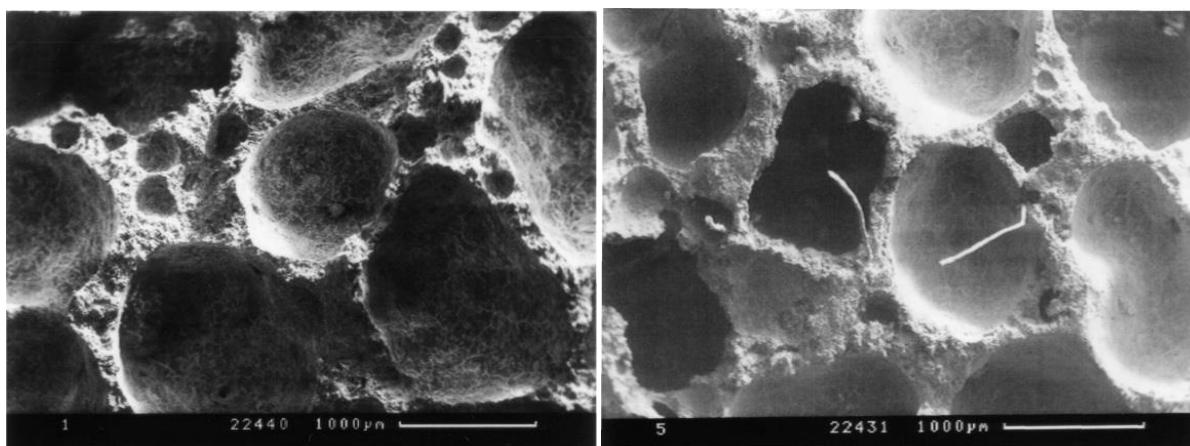
Рис. 8. Зависимость предела прочности на сжатие и средней плотности газобетона от содержания текстильного корда

Текстильный корд играет роль дополнительного центра кристаллизации новообразований цемента, что способствует увеличению его прочности. Волокна в составе трехфазных дисперсных систем можно считать протяженными поверхностями раздела фаз. При формировании структуры сырьевой смеси в процессе перемешивания мельчайшие частицы цемента первыми перемещаются к протяженным поверхностям раздела фаз, где в первую очередь гидратируются и образуют высокопрочные соединения цементного камня.

Введение отработанного текстильного корда влияет на характер пористости (макроструктуру) неавтоклавного газобетона. В газобетоне с оптимальным содержанием волокна преобладают замкнутые поры размером 0,5–1 мм, которые имеют правильную преимущественно овальную форму и плотные межпоровые перегородки (рис. 9). Макропоры дисперсно-армированного газобетона имеют гладкую внутреннюю поверхность, а газобетона без волокон – рыхлую, что ослабляет сечение межпоровой перегородки и снижает прочность газобетона.

В работе проводились эксперименты по определению усадки при высыхании газобетона по стандартной методике. По значениям усадки при высыхании образцов в интервале влажности от 35 до 5 % строили кривую усадки, с помощью которой определяли показатель усадки при высыхании. Усадка при высыхании газобетона с оптимальной добавкой текстильного корда (состав № 1) на 33 % ниже усадки образцов контрольного состава. Минимальной усадкой обладает газобетон с текстильным кордом в оптимальном количестве и химической добавкой (состав № 2). В этом случае усадка при высыхании может быть снижена на 45 % по

сравнению с образцами контрольного состава. При введении волокон корда заметно уменьшается водопоглощение газобетона по сравнению с контрольным составом (табл. 2).



а

б

Рис. 9. Макроструктура газобетона контрольного состава (а) и с оптимальной добавкой отработанного текстильного корда (б) в возрасте 28 суток ( $\times 50$ )

Таблица 2

Физико-механические свойства неавтоклавного теплоизоляционного газобетона на основе предварительно приготовленной сухой смеси

Физико-механические показатели	Состав № 1	Состав № 2	Требования ГОСТ 25485-89
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> (марка по плотности)	452 (D500)	465 (D500)	D500
Предел прочности на сжатие в возрасте 3 суток, МПа	0,70	0,67	–
Предел прочности на сжатие в возрасте 28 суток, МПа (класс по прочности)	1,56 (B1)	1,64 (B1)	B0,75; B1
Предел прочности на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток, МПа	0,39	0,42	–
Водопоглощение по массе, %	45	46	–
Водопоглощение по объему, %	20	21	–
Усадка при высыхании, мм/м	2,9	2,7	–

Теплопроводность газобетона определяли с помощью прибора ИТП-МГ4 на образцах, высушенных до постоянной массы при температуре 105 °С. Перед испытаниями образцы выдерживали не менее 1 ч при температуре помещения, в котором проводились испытания (23 °С). Образцы для определения теплопроводности изготавливали в виде пластин

размером в плане 100×100 мм и толщиной около 30 мм. Теплопроводность газобетона для всех исследованных составов оказалась равной 0,110 Вт/м·К, что соответствует нормативным требованиям.

Полученный из предварительно приготовленной сухой смеси составов № 1 и 2 теплоизоляционный неавтоклавный газобетон характеризовался равномерной высокопористой структурой. Данные табл. 2 показывают, что качественные показатели обоих составов полностью соответствуют требованиям ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. Технические условия».

Расчетный экономический эффект при производстве неавтоклавного газобетона из сухой предварительно приготовленной смеси составляет 400 руб/м<sup>3</sup>. Снижение себестоимости продукции по сравнению с традиционным автоклавным ячеистым бетоном на 30–35 % обусловлено широким использованием техногенных отходов, уменьшением затрат на природный газ и электроэнергию и меньшими капиталовложениями. Применение техногенных отходов, в частности отработанного текстильного корда, полученного при переработке старых шин, позволяет не только утилизировать эти отходы и улучшить экологическую ситуацию в регионе, но и повысить физико-механические и технико-строительные показатели неавтоклавного газобетона.

Таким образом, в работе получен новый вид сухих строительных смесей для изготовления высокотехнологичного дисперсно-армированного теплоизоляционного газобетона неавтоклавного твердения и, соответственно, предложена новая схема организации технологического процесса производства этого востребованного в строительстве материала. Согласно этой схеме, качественный газобетон изготавливается в построечных условиях из предварительно приготовленной в централизованном порядке сухой смеси, содержащей все необходимые компоненты. Полученный материал может использоваться при заполнении многослойных ограждающих конструкций и выполнении других теплоизоляционных работ непосредственно на месте в процессе строительства и реконструкции зданий, а также в заводских условиях при изготовлении мелкоштучных изделий.

Результаты представленных научных исследований являются предпосылками разработки теоретических основ расчета и оптимизации составов реакционно-порошковых сырьевых композиций для изготовления высокотехнологичных энергоэффективных строительных композитов нового поколения с ячеистой, а также при соответствующем научно-методическом подходе с плотной структурой и сниженным на 20–30 % расходом цемента, в которых эффективно используются техногенные отходы.

### **Библиографический список**

1. Моргун Л.В. Эффективность применения фибропенобетона в современном строительстве // Строительные материалы. 2002. № 3. С. 16–17.
2. Пухаренко Ю.В. Прочность и долговечность ячеистого фибробетона // Строительные материалы. 2004. № 12. С. 40–41.
3. Селиванов В.М., Шильцина А.Д., Гныря А.И. Сухие газобетонные смеси на основе вторичного сырья и отходов промышленности // Строительные материалы. 2000. № 9. С. 10–11.
4. Кузнецов В.А., Шершневу Ю.М. К вопросу о производстве сухих смесей для поробетона // Технологии бетонов. 2005. № 4. С. 39–42.
5. Коровяков В.Ф. Применение изделий из пеносиликата «Эволитермо» – решение проблемы теплоизоляции в жилищном и промышленном строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 2. С. 18–19.
6. Макарова Н.Е., Соломатов В.И., Щетинина Т.А. Влияние способа обработки газообразователя на кинетику вспучивания и газовыделения наполненного цементного теста // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. № 8. С. 34–35.
7. Федьнин Н.И. Роль частиц несгоревшего топлива в формировании свойств ячеистого золобетона (ускоренные методы анализа) // Строительные материалы. 1998. № 9. С. 38–41.
8. Хозин В.Г., Магдеев У.Х. Сухая смесь для получения пенобетона // Сухие строительные смеси. 2008. № 2. С. 32–33.
9. Щукина Ю.В. Золосодержащие сухие смеси для производства газобетона // Десятые академические чтения РААСН. Казань: КГАСУ, 2006. С. 683–688.
10. Разработка составов сухих смесей для производства неавтоклавных ячеистых бетонов смесей / В.Д. Черкасов [и др.] // Вестник отделения строительных наук. 2006. Вып. 10. С. 131–135.
11. Исследование свойств ячеистых бетонов, полученных на основе сухих смесей / В.Д. Черкасов [и др.] // Вестник отделения строительных наук. 2008. Вып. 12. С. 292–295.
12. Сахаров Г.П. Реологические свойства холодных строительных смесей в процессах перемешивания, формования и твердения при изготовлении ячеистого бетона // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума «Реология бетонных смесей и ее технологические задачи». Рига: Рижский политехнический институт, 1982. С. 412–413.
13. Гладких К.В. Изделия из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол. М.: Стройиздат, 1976. 256 с.
14. Рабинович Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 174 с.

15. Белов В.В. Разработка теории и методики определения реологических характеристик дисперсных систем на пенетрационной реометре // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сборник материалов Международной научно-технической конференции. Тула: ТулГУ, 2002. С. 9–10.

16. Белов В.В., Курятников Ю.Ю. Модифицирование сухих поробетонных смесей на основе техногенных вторичных ресурсов // Строительные материалы. 2008. № 2. С. 6–7.

17. Белов В.В., Курятников Ю.Ю. Использование отработанного текстильного корда при изготовлении неавтоклавного газобетона // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии: материалы XV Академических чтений РААСН: Международная научно-техническая конференция. Т. 1. Казань: КГАСУ, 2010. С. 288–293.

## **DRY MIXTURES FOR MAKING CELLULAR CONCRETE: CURRENT STATE OF THE PROBLEM, EXPERIMENTAL STUDIES, PROSPECTS OF PRODUCTION AND APPLICATION**

**Belov V.V., Kuryatnikov Yu.Yu.**

***Abstract.** The requirements for the composition of the dry mixture from the position of forming the structure of gas concrete are formulated and scientifically justified. Quantitative relationships between component composition of dry ash-containing mixture, structure and physical and mechanical properties of aerated concrete are presented. Based on the developed method of determining the indirect rheological properties of the gas-concrete mixture, the effect of the mixing duration of the gas-concrete mixture on the structure and properties of natural hardening gas-concrete was established. The possibility of using spent textile cord as dispersing-reinforcing additive is justified and its positive effect on structure formation and operational properties of non-autoclave hardening gas concrete based on dry ash-containing mixture is established. Technological peculiarities of dry mixture and non-autoclave gas concrete production based on it are described.*

***Keywords:** composition of dry ash-containing mixture of aerated concrete, quantitative relationships between components, structure and physical and mechanical properties of aerated concrete.*

Об авторах:

БЕЛОВ Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», Тверь. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

About the authors:

BELOV Vladimir Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

KURYATNIKOV Yuri Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

УДК 691.322:004.421

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ БЕЗОБЖИГОВОГО ВЯЖУЩЕГО**

**Белов В.В., Смирнов М.А.**

© Белов В.В., Смирнов М.А., 2021

***Аннотация.** Рассмотрена возможность получения вяжущего на основе безобжигового глинистого сырья. Дано теоретическое описание взаимодействия добавки извести как активатора с глинистыми грунтами. Показана вероятность создания строительных материалов из глинистого сырья с требуемыми эксплуатационными показателями.*

***Ключевые слова:** строительные материалы из глинистого сырья, получение вяжущего.*

Глина является одним из самых древних строительных материалов. Если ее размочить, она становится вязкой, пластичной и податливой, а при высыхании сохраняет форму и со временем становится более прочной. Этот процесс можно ускорить при помощи обжига, однако пережженные и глазурованные керамические изделия теряют способность «дышать».

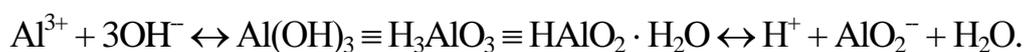
Существует несколько способов усиления водостойкости и структурной прочности глиняных конструкций без использования высокотемпературного обжига, связанные со стабилизацией естественного бетона. Стабилизация грунта осуществляется также с помощью органических и неорганических добавок, которые необходимы для армирования, гидроизоляции и улучшения поверхностных характеристик [1].

В результате взаимодействия неорганических вяжущих и коллоидно-глинистой составляющей грунты образуют материалы, обладающие повышенной морозостойкостью и долговечностью, в частности комплексно укрепленные грунты.

В дорожном строительстве методами искусственного укрепления грунтов занимаются давно. Их сущность заключается в цементации и известковании грунтов, комплексной обработке органическими минеральными вяжущими, в результате чего происходит коагуляция глинисто-коллоидных фракций с приобретением свойств, отвечающих требованиям по водостойкости. Увеличивается сцепление между частицами и агрегатами грунта, что приводит к повышению сил трения, прочности и морозостойкости грунта.

В качестве неорганических стабилизаторов используют добавки портландцемента, извести и силикатные соединения. На сегодняшний день цемент является самым распространенным закрепителем, однако если его в бетоне слишком много, грунт теряет свои положительные свойства и становится похожим на камень. По этой причине более предпочтительно использование вместо цемента молотой, негашеной и гашеной извести.

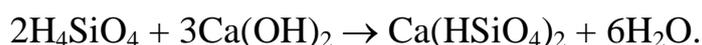
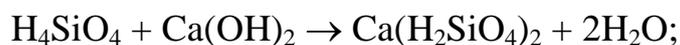
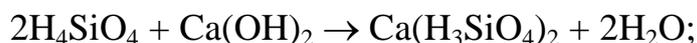
При внесении добавок извести в грунт происходит растворение и диссоциация в жидкой фазе грунта таких наиболее растворимых ее соединений, как  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$  и т. д. Перешедшие в раствор соединения в силу своей щелочности смещают реакцию среды грунта [2]. В связи с этим начинают развиваться химические реакции противодействия грунта за счет присущих ему факторов буферности, т. е. интенсифицируются процессы, заключающиеся в частичной или полной нейтрализации (в случае резко-кислой реакции грунта и применения малых добавок) перешедших в грунтовый раствор  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$  и т. д. При этом особую роль играют гумусовые вещества и полуторные окислы грунта, которые из-за своей амфотерности взаимодействуют с перешедшими в грунтовый раствор щелочами как соответствующие кислоты. Гидроокись алюминия вступает в химические реакции с кислотами и щелочами, что можно представить уравнением



Диссоциация	Диссоциация
в кислой среде как основания	в щелочной среде как кислоты

Если добавлено много извести и возможно полное преодоление реагентом факторов буферности грунта, то образуется насыщенный водный раствор гидроокисей кальция, магния и т. д. Под влиянием гидролизующих агентов происходит разрушение алюмосиликатов грунта путем разрыва гетероцепных связей  $Si-O-Si$ ,  $Si-O-Al-O-Si-O$  и др.

В результате процесса щелочно-гидролитической деполимеризации алюмосиликатов формируется многокомпонентная взаимодействующая система  $\text{CaO} + \text{MgO} - \Sigma(\text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O} + \text{RO} + \dots)$ . Выделяющаяся при этом ортокремневая кислота  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  или  $\text{Si}(\text{OH})_4$  может вступать в следующие реакции образования кислых солей:



То же происходит и с высвобождающимися при разрушении алюмосиликатов грунта полуторными окислами, в результате чего вначале образуются кислые гидроалюминаты и гидроферриты кальция. Следует учитывать, что в силу амфотерности эти соединения в щелочной среде могут диффундировать в раствор при разрушении кристаллической решетки алюмосиликатов в виде мономерных комплексных ионов, например  $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$ . Процесс образования исходных гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроферритов кальция можно рассматривать как системы «известь – грунт».

Образовавшиеся кислые или малоосновные соединения в условиях некоторого избытка непрерывно поступающих во взаимодействующую систему  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  начинают претерпевать в результате реакций гидролиза сложные фазовые превращения в направлении синтеза более стабильных основных соединений типа трехкальциевого силиката ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaO}$  или  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), трехкальциевого алюмината ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), четырехкальциевого алюмоферрита ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и различных видов комплексных гидросиликатов. По мере развития химических реакций наступает стадия количественной оптимизации состава и соотношения продуктов фазовых превращений, что приводит к осуществлению реакций полимеризации и поликонденсации различных гидросиликатов, гидроалюминатов и других продуктов и к формированию новообразований, обладающих вяжущими свойствами. Например, в гидросиликатах типа  $\text{Ca}_3[\text{O}_3\text{Si}(\text{OH})_2]_2 \equiv 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  наличие силанольной группы ( $-\text{Si}-\text{OH}$ ) обуславливает способность данного соединения к реакции поликонденсации, что характерно также для различных видов гидросиликатов кальция. Аналогичными свойствами обладают гидроалюминаты и гидроалюмоферриты кальция, а также различные виды комплексных соединений, в состав которых входят  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_2\text{O}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Необходимо также отметить, что процессы полимеризационного структурообразования в системах «известь – грунт» могут сопровождаться коллоидацией отдельных кислых соединений. Помимо этого, может развиваться кристаллизация конечных и промежуточных продуктов химических

реакций в зависимости от влияния различных по своей природе факторов (химических, физико-химических, физико-механических).

Обобщая изложенное, отметим, что приведенная интерпретация химических процессов, происходящих в системах «известь – грунт», не только соответствует известным представлениям и экспериментальным результатам в области технической мелиорации глинистых грунтов, но и позволяет объяснить специфические особенности осуществления тех или иных химических реакций в указанных системах применительно к свойствам извести и обрабатываемых ею грунтов.

Разработка технологии глиношлаковых композиционных материалов автоклавного твердения является продолжением комплекса исследовательских работ, связанных с созданием новых безобжиговых строительных материалов. Проведенные исследования по сравнительной оценке прочностных свойств глиношлаковых композиций автоклавного твердения показали высокую эффективность автоклавной обработки [3].

Изучение свойств грунтов, укрепленных известью, показало, что дозировка, а также дисперсность существенно влияют на свойства и физико-механические характеристики материалов. Так, при укреплении всех видов грунтов чистой известью получают дорожно-строительные материалы с плохой уплотняемостью, низкой морозостойкостью и деформативностью.

По результатам исследований было установлено, что при дозировке извести от 1 до 20 % в системе «грунт – известь» не образуются кристаллизационные связи, а происходит лишь агрегатирование глинисто-коллоидной фракции грунта [4]. Материал неморозоустойчив и разрушается после 3–4 циклов замораживания-оттаивания. При дозировке от 3 до 5 % образцы имеют большую прочность и морозостойкость.

В результате взаимодействия грунта, а именно алюмосиликатной составляющей, с известью образуются гидросиликаты и гидроалюмосиликаты, обеспечивающие морозостойкость и прочность материала основания. Разрушение образцов наступает после 12–14 циклов попеременного замораживания и оттаивания. При дозировке от 6 до 20 % происходит стабилизация прочности и морозостойкости. В данном случае происходит насыщение структуры кристаллизованными связями. Согласно полученным данным по физико-механическим свойствам, установлено, что при дозировке извести от 11 до 16 % возникает дополнительное изменение свойств, это зависит от комплексной активности грунта. Грунты, укрепленные известью, обладают сравнительно низкой морозостойкостью, так как они имеют значительную пористость и влагоемкость, а известковый цемент недостаточно прочен. Для нахождения эффективных средств повышения морозостойкости грунтов, укрепленных известью, были испытаны добавки шлака и цемента. Добавка шлака приводит к увеличению кристаллов гидрата окиси кальция в процессе его кристаллизации. Образование

более крупных кристаллов приводит к дополнительной растворимости гидрата окиси кальция, а следовательно, и к повышению водостойкости грунтов, укрепленных известью.

Сведения о создании геополимерных вяжущих из дисперсных горных пород без их обжига с добавками, изменяющими минералогическую природу этих веществ в нужную сторону, чрезвычайно скудны. Разработанные в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства низкощелочные, смешанные глино-, карбонатно- и опочно-шлаковые вяжущие существенно расширили сырьевую базу для их производства и позволили сократить расходы шлака в 1,5–2 раза и щелочных активизаторов NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> в 2–3 раза по сравнению со шлакощелочными вяжущими. Доказано, что структурная топология таких смесей наиболее оптимальна, а «прорастание» и цементация инертных частиц целого ряда природных глин и кальциевых известняков продуктами гидратации шлака обеспечивают высокие физико-технические показатели [5].

Несмотря на достоинства изготовленных безобжиговым способом материалов на основе глин, в качестве стеновых они не отвечают требованиям по показателям прочности при сжатии, теплопроводности, имеют низкую водо- и морозостойкость. С целью повышения эксплуатационных показателей строительных материалов из глинистого сырья для малоэтажного строительства необходимо улучшить их структуру посредством применения эффективных минеральных и органических добавок в комплексе с различными технологическими приемами [6].

В.В. Белов с коллегами в Тверском государственном техническом университете получили глиняный бетон, состоящий из цемента, глины, опилок и торфа [7]. Из него изготавливали лабораторные образцы по обычной технологии (формование, вибрационное уплотнение, пропаривание, сушка) и испытывали на плотность и прочность на сжатие. Плотность образцов соответствовала стандартной плотности легких бетонов (от 585 до 603 кг/м<sup>3</sup>), в которых в качестве наполнителей используют шлаки, пемзу, керамзит и туф. Также норме соответствовала прочность бетона на сжатие. Промышленные испытания нового материала не проводились, но изобретатели уверены, что его можно использовать и в гражданском, и в промышленном строительстве.

Таким образом, рассмотрено получение безобжиговых материалов на основе глин, отвечающих требованиям по показателям прочности при сжатии, теплопроводности и имеющих достаточно высокую водо- и морозостойкость.

#### **Библиографический список**

1. Матвеева Л.Ю. Глина как строительный материал. URL: <http://www.milzem.ru> (дата обращения: 18.01.2021).

2. Кнатько В.М. Укрепление дисперсных грунтов путем синтеза неорганических вяжущих. Л.: ЛГУ, 1989. 274 с.

3. Калашников В.И. Перспективы развития геополимерных вяжущих // Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения: Восьмые академические чтения отделения строительных наук РААСН. Самара: СГАСУ, 2004. С. 193–195.

4. Романенко И., Тимофеева О., Жигалов В. Способы укрепления грунтов основания дорог. Пенза: ПГАСА, 2006. 42 с.

5. Гидротермальная активация глиношлаковых композиционных материалов / В.Ю. Нестеров [и др.] // Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения: VIII Академические чтения отделения строительных наук РААСН. Самара: СГАСУ, 2004. С. 367–369.

6. Лошанина О.Н. Строительные материалы из стабилизированного глинистого сырья для малоэтажного строительства. URL: <http://www.smdomgl.ru> (дата обращения: 18.01.2021).

7. Бетонная смесь: пат. 2136624 Рос. Федерация / Белов В.В., Л.И. Ганина, А.И. Глушков [и др.]; опубл. 10.09.1999.

## USE OF CLAYEY RAW MATERIALS AS A FAT-FREE BINDER

**Belov V.V., Smirnov M.A.**

***Abstract.** The possibility of producing binder on the basis of non-burnt clay raw materials is considered. Theoretically, a description is given of the interaction of lime additive as an activator with clay soils. The possibility of creating construction materials from clay raw materials with the required operational parameters is shown.*

***Keywords:** Construction materials from clay raw materials, production of binder.*

Об авторах:

БЕЛОВ Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: [vladim-bel@yandex.ru](mailto:vladim-bel@yandex.ru)

СМИРНОВ Матвей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: [matiu.sm@yandex.ru](mailto:matiu.sm@yandex.ru)

About the authors:

BELOV Vladimir Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

SMIRNOV Matvey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

УДК 691.311

## МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ АНГИДРИТОВОГО ВЯЖУЩЕГО КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ

Бурьянов А.Ф., Булдыжова Е.Н., Гальцева Н.А.

© Бурьянов А.Ф., Булдыжова Е.Н.,  
Гальцева Н.А., 2021

*Аннотация.* В статье рассмотрены результаты исследований по разработке комплексной добавки для сухих строительных смесей на основе синтетического ангидрита. Показаны возможности применения различных добавок и регулирования их свойств на примере синтетического ангидрита.

*Ключевые слова:* добавка, модификатор, гипсовое вяжущее, ангидрит, синтетический ангидрит.

Производство сухих строительных смесей – одна из наиболее молодых и динамично развивающихся отраслей строительной индустрии. В России активно проводятся научные исследования в направлении создания и использования сухих строительных смесей, значительно увеличилось количество статей, патентов и специализированных конференций. Исследования направлены на разработки новых методик определения характеристик сухих смесей, снижение себестоимости продукции, расширение сырьевой базы, оптимизацию уже имеющихся составов.

Перспективным направлением является изучение сухих строительных смесей на основе гипсового вяжущего, которое обладает рядом ценных качеств. Для большего применения сухих смесей необходимо повысить их эффективность и расширить номенклатуру, в том числе за счет использования в составах нерастворимого ангидрита [1].

Результаты исследований структуро- и порообразования композиционных гипсовых вяжущих А.В. Ферронской, В.Ф. Коровякова, Б.М. Румянцева, М.С. Садуакасова и Г.Ю. Строевой [2, 3] показывают, что при введе-

нии пластифицирующей добавки и вследствие ослабления водовяжущего отношения уменьшается общая и закрытая пористость материала, а также размер пор. Такие изменения микроструктуры гипсовых материалов приводят к повышению их прочности, водо- и морозостойкости.

Общеизвестна роль водотвердого отношения в твердении вяжущих веществ. Снижение содержания воды в композициях на основе ангидрита ведет к повышению прочности материала, увеличению его плотности, снижению гигроскопичности, скорости растворения, увеличению водостойкости, ускорению сушки изделий и повышению экономичности производства.

В качестве добавок, снижающих водопотребность ангидритового вяжущего (В/А), используются как пластификаторы, так и суперпластификаторы различной природы и состава [4]. Известна неоднозначность их действия, особенно в комплексе с активизаторами твердения. Повышение прочности в их присутствии связывают не только со снижением водосодержания, но и с образованием мелкокристаллической структуры камня. При этом отмечается, что между ангидритом и полимером химическое взаимодействие не происходит. Таким образом, механизм влияния пластификаторов на твердение ангидрита практически не изучен, а имеющиеся экспериментальные данные носят противоречивый характер.

Химические добавки, вводимые в В/А, могут существенно влиять не только на его свойства и кинетику твердения, но и на морфологию кристаллов двуводного гипса и пористую структуру затвердевшего материала, что, в свою очередь, определяет его прочность [5]. На основании предварительных исследований добавок и катализаторов были использованы гашеная известь и портландцемент М500-Д0 (в качестве щелочных активаторов), а также сульфат калия (в качестве сульфатных активаторов), как наиболее отвечающие необходимым техническим и технологическим характеристикам. В табл. 1 приведены результаты изучения влияния модифицирующей добавки, состоящей из щелочного (портландцемента) и сульфатного активаторов (сульфата калия), на свойства синтетического ангидрита [6]. Исследования проводились с целью изготовления из синтетического ангидрита сухой строительной смеси для закладки выработанных пространств, для чего необходимо соблюдать требования по срокам схватывания и подвижности смеси.

Для определения оптимальной удельной поверхности вяжущего были проведены испытания, в которых смесь синтетического ангидрита с добавкой портландцемента и сульфата калия перемалывали в вибромельнице до удельной поверхности от 350 до 550 м<sup>2</sup>/кг. Для полученных образцов вяжущего определялись сроки схватывания и прочность в возрасте 7 суток.

На основании проведенных исследований установлено, что оптимальная удельная поверхность, при которой свойства модифицированного вяжущего обеспечат получение закладочных смесей с требуемыми характеристиками, равна  $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Таблица 1

Влияние модифицирующей добавки  
на свойства синтетического ангидрита

№	Добавки-ускорители		В/А, %	Сроки схватывания	
	Вид	Количество, %		Начало	Конец
1	Без добавки	–	28	Через сутки нет схватывания, усадка	
2	Цемент (М500-Д0)	5	48	1 ч 10 мин	2 ч 30 мин
	$\text{K}_2\text{SO}_4$	2			
3	Цемент (М500-Д0)	2,5	41	1 ч 10 мин	2 ч 50 мин
	$\text{K}_2\text{SO}_4$	2			
4	Цемент (М500-Д0)	2,5	40	1 ч 50 мин	3 ч 00 мин
	$\text{K}_2\text{SO}_4$	1			
5	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0,3	39	0 ч 50 мин	1 ч 50 мин
	$\text{K}_2\text{SO}_4$	1			

Также исследовалось применение различных видов пластификаторов (табл. 2), что обосновано необходимостью сохранения подвижности смеси при подаче материала в выработку.

Таблица 2

Зависимость свойств ангидритового вяжущего от вида пластификатора

Добавка	Содержание, % от В/В	В/В, %	Сроки схватывания	Прочность в возрасте, МПа	
				суток	7 суток
С-3	0,97	30,0	Начало схватывания через 28 ч	1–3	25,3
ЛСТ	0,5	33,0	Начало схватывания через 3 суток не наступило	–	–
Melment F10	0,4–1	30	Начало 120–225 мин, окончание 180–355 мин	6,9–13,3	24,0–33,5
Laolin 1	0,46	40	Начало схватывания через 3 суток не наступило	–	–

Результаты исследований показали, что для модифицированного вяжущего на основе синтетического ангидрита, который содержит 2,5 % портландцемента и 1 % сульфата калия, лучшие показатели дала пластифицирующая добавка Melment F10 в дозировке от 0,4 до 1 % от массы водовяжущего отношения (В/В) [7, 8].

Проведенные исследования показали, что применение модифицированных вяжущих на основе гипса и ангидрита актуально и перспективно, так как они позволяют регулировать технологические свойства конечных продуктов. Модифицированные вяжущие на основе гипса и ангидрита возможно применять для производства сухих смесей примерной проектной прочностью 10 МПа, стеновых гипсобетонных камней и в составах смесей для устройства монолитных оснований и стяжек полов (наливных полов).

### **Библиографический список**

1. Коровяков В.Ф., Бурьянов А.Ф. Научно-технические предпосылки эффективного использования гипсовых материалов в строительстве // Жилищное строительство. 2015. № 12. С. 38–40.
2. Садуакасов М.С., Румянцев Б.М. Теоретические основы повышения прочности структуры гипсового камня на основе пластифицированного вяжущего // Строительные материалы. 1993. № 3. С. 19–22.
3. Комплексные добавки для легких бетонов на основе водостойких гипсовых вяжущих / А.В. Ферронская, Г.Ю. Строева, В.Ф. Коровяков, Г.Н. Петрова // Строительные материалы. 1985. № 3. С. 27–28.
4. Пустовгар А.П., Василик П.Г., Бурьянов А.Ф. Особенности применения гиперпластификаторов в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2010. № 1. С. 61–64.
5. Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем негидратационного твердения / В.Б. Петропавловская [и др.] // Строительные материалы. 2010. № 7. С. 22–24.
6. Получение синтетического ангидрита сульфата кальция из концентрированной серной кислоты и молотого известняка / А.Ф. Бурьянов [и др.] // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 16–19.
7. Бурьянов А.Ф., Гальцева Н.А., Грунина И.А. Использование отходов пиromеталлургической промышленности в производстве материалов для закладки горных выработок // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 2. С. 21–26.
8. Закладочные смеси на основе синтетического ангидрита / А.Ф. Бурьянов, Н.А. Гальцева, С.С. Ребров, В.Г. Соловьев, Г.И. Яковлев. М.: Де Нова, 2020. 168 с.

## MODIFICATION OF THE STRUCTURE OF THE ANHYDRITE BINDER BY A COMPLEX ADDITIVE

**Buryanov A.F., Buldyzhova E.N., Galtseva N.A.**

***Abstract.** The article discusses the results of research on the development of a complex additive for dry building mixtures based on synthetic anhydrite. The possibilities of using various additives and the possibility of regulating their properties are shown on the example of synthetic anhydrite.*

***Keywords:** additive, modifier, gypsum binder, anhydrite, synthetic anhydrite.*

Об авторах:

БУРЬЯНОВ Александр Федорович – доктор технических наук, консультант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: rga-service@mail.ru

БУЛДЫЖОВА Елена Николаевна – преподаватель кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: nusik-90@yandex.ru

ГАЛЫЦЕВА Надежда Алексеевна – доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: galcevanadezda@mail.ru

About the authors:

BURYANOV Alexander Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Consultant of the Department of Binder and Concrete Technology, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: rga-service@mail.ru

BULDYZHOVA Elena Nikolaevna – Lecturer at the Department of Binder and Concrete Technology, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: nusik-90@yandex.ru

GALTSEVA Nadezhda Alekseevna – Associate Professor of the Department of Binder and Concrete Technology, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: galcevanadezda@mail.ru

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ ПОЛЮСА  
ПРЯМЫХ ТЕМПЕРАТУР ПО ОСИ  $\sigma$   
НА ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ КОНСТАНТЫ  
ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ЖУРКОВА**

**Горохов Т.И., Ерофеев А.В., Данилов В.М.**

© Горохов Т.И., Ерофеев А.В.,  
Данилов В.М., 2021

*Аннотация.* В статье приведены результаты влияния смещения полюса прямых температур в координатах  $lgt - \sigma$  по оси абсцисс на термофлуктуационные константы, входящие в уравнение Журкова. На основании анализа полученных констант для двадцати искусственных пучков построены диаграммы зависимости изменения константы  $U_0$  от величины смещения полюса относительно базового пучка.

*Ключевые слова:* долговечность, прогнозирование, поливинилхлорид, термофлуктуация, уравнение Журкова.

На сегодняшний день расчеты всех строительных конструкций ведутся по методу предельных состояний, при котором не допускается наступление одного из двух предельных состояний (разрушение, недопущение деформаций). Метод основывается на классических теориях прочности, в их основе лежит постулат о том, что разрушение твердого тела является критическим событием, т. е. наступает при достижении определенного максимального значения напряжения. Таким образом, согласно положению теории, твердое тело под действием не критического напряжения при любых температурах будет существовать бесконечно. Однако очевидно, что это не так: экспериментально наблюдается наличие температурно-силовой временной зависимости процессов разрушения и деформирования твердых тел. Классические теории прочности не учитывают наличие температурно-силовой временной зависимости процесса разрушения. В связи с этим прогнозирование продолжительности работоспособности материала и конструкции целесообразно проводить с позиции термофлуктуационной (кинетической) концепции разрушения деформирования твердого тела, в основе которой разрушение твердого тела рассматривается как термоактивационный процесс, развивающийся во времени при приложении к телу нагрузки [1]. Решающая роль в разрушении тела в данном случае отводится тепловому движению атомов. Данный способ имеет ряд недостатков и ограничений использования, что приводит к занижениям

или завышениям расчетных сроков службы строительных материалов и конструкций [2].

Согласно термофлуктуационной концепции, долговечность определяется по формуле

$$\tau = \tau_m \cdot \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right],$$

где  $\tau$  – долговечность, с;

$\tau_m$  – минимальное время разрушения твердого тела, с;

$U_0$  – эффективная энергия активации разрушения, кДж/моль;

$\gamma$  – структурно-чувствительная константа, кДж/(моль·МПа);

$R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);

$\sigma$  – напряжение, МПа;

$T$  – температура, К;

$T_m$  – предельная температура существования твердого тела, при которой оно распадается за одно тепловое колебание, К.

Существующая методика определения термофлуктуационных констант, входящих в обобщенное уравнения Журкова, основана на перестроении прямых температур (график в координатах  $lg\tau - \sigma$ ) в прямые напряжений (график в координатах  $lg\tau - 1/T$ ). На основании полученного графика строится график в системе координат  $U - \sigma$ . Построенные графики позволяют определить все четыре термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова.

Координаты точки полюса и угол наклона прямых температур, определяющийся предельной температурой существования твердого тела, являются определяющими величин термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова. Поэтому логически обоснованным является предположение о том, что изменение только одного из этих параметров, например значения ординаты точки полюса, приводит к изменению конкретной термофлуктуационной константы.

Для выявления зависимости влияния смещения полюса прямых температур по оси абсцисс в системе координат  $lg\tau - \sigma$  (рис. 1) на термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова необходимо определить термофлуктуационные константы экспериментально построенного пучка прямых температур (базового пучка) и искусственно полученных путем смещения координаты ординаты точки полюса на различные величины пучков прямых температур. В качестве базового пучка выбран экспериментально полученный пучок при исследовании долговечности поливинилхлоридных плит при поперечном изгибе [3].

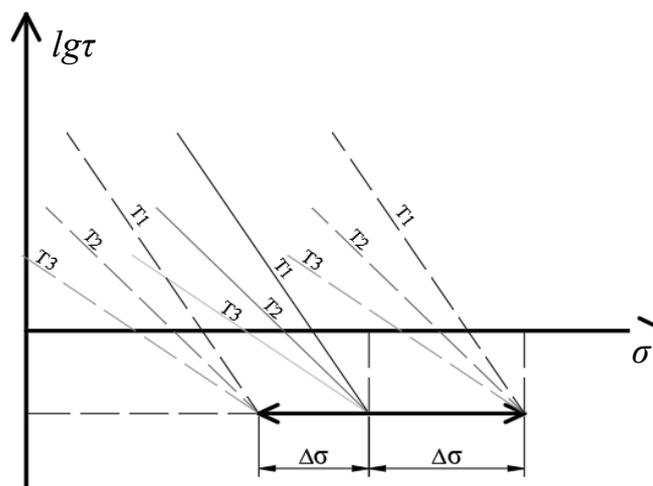


Рис. 1. Смещение пучка по оси абсцисс

Для смещения точки полюса прямых температур базового пучка в координатах  $lg\tau - \sigma$  по оси абсцисс (в сторону) необходимо изменить в исходных данных все значения  $\sigma$  на общую величину, принимаемую в процентном соотношении от значения  $\sigma$  координаты точки полюса. Шаг смещения равен 5 %. Результаты нахождения термофлуктуационных констант базового и двадцати искусственно полученных пучков температур сведены в таблицу.

Термофлуктуационные константы  
искусственных пучков, полученных при смещении полюса в сторону

Шаг смещения	$\Delta\sigma$	$\sigma_p$	$lg\tau$	$1000/T_m$	$U_0$	$\gamma$	$\frac{U}{U_0} \cdot 100\%$	
Влево	-50 %	-3,58	3,58	-2,34	2,28	156,92	-43,85	-50
	-45 %	-3,22	3,94	-2,34	2,28	172,62	-43,85	-45
	-40 %	-2,86	4,29	-2,34	2,28	188,31	-43,85	-40
	-35 %	-2,50	4,65	-2,34	2,28	204,00	-43,85	-35
	-30 %	-2,15	5,01	-2,34	2,28	219,69	-43,85	-30
	-25 %	-1,79	5,37	-2,34	2,28	235,39	-43,85	-25
	-20 %	-1,43	5,73	-2,34	2,28	251,08	-43,85	-20
	-15 %	-1,07	6,08	-2,34	2,28	266,77	-43,85	-15
	-10 %	-0,72	6,44	-2,34	2,28	282,46	-43,85	-10
-5 %	-0,36	6,80	-2,34	2,28	298,16	-43,85	-5	
Нач.	0 %	0,00	7,16	-2,34	2,28	313,85	-43,85	0
Вправо	5 %	0,36	7,51	-2,34	2,28	329,54	-43,85	5
	10 %	0,72	7,87	-2,34	2,28	345,23	-43,85	10
	15 %	1,07	8,23	-2,34	2,28	360,93	-43,85	15
	20 %	1,43	8,59	-2,34	2,28	376,62	-43,85	20
	25 %	1,79	8,95	-2,34	2,28	392,31	-43,85	25
	30 %	2,15	9,30	-2,34	2,28	408,00	-43,85	30
	35 %	2,50	9,66	-2,34	2,28	423,70	-43,85	35
	40 %	2,86	10,02	-2,34	2,28	439,39	-43,85	40

Окончание таблицы

Шаг смещения		$\Delta\sigma$	$\sigma_p$	$lgt$	$1\ 000/T_m$	$U_0$	$\gamma$	$\frac{U}{U_0} 100\%$
Вправо	45 %	3,22	10,38	-2,34	2,28	455,08	-43,85	45
	50 %	3,58	10,74	-2,34	2,28	470,77	-43,85	50
	55 %	3,94	11,09	-2,34	2,28	486,47	-43,85	55

Анализ таблицы согласуется с выдвинутой гипотезой: при изменении только координаты точки полюса по оси абсцисс изменяется термофлуктуационная константа  $U_0$ , остальные же остаются неизменными. Также можно заметить, что наблюдается линейная зависимость изменения константы  $U_0$  от величины смещения полюса относительно базового пучка (рис. 2).

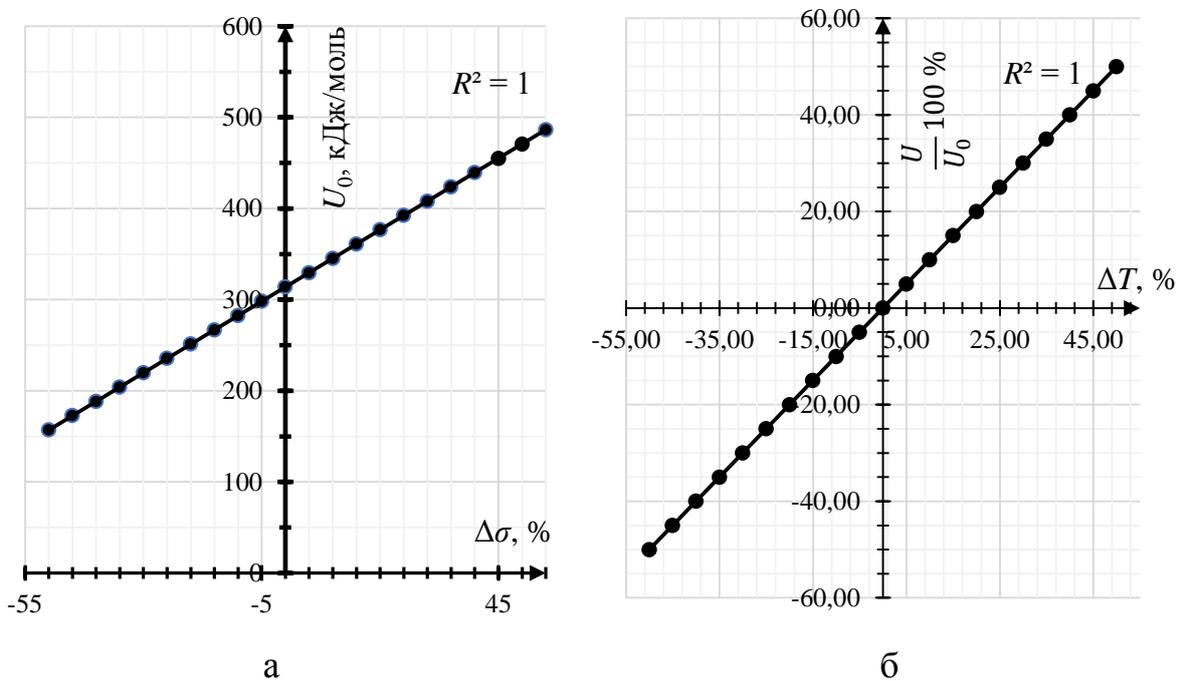


Рис. 2. Графики зависимостей: *а* – изменения  $U_0$  от  $\Delta\sigma$ ; *б* – относительного изменения  $U_0$  от  $\Delta T$

Таким образом, установленная зависимость показывает возможность разработки методики определения термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова путем определенных манипуляций с эталонным пучком, для которого известны термофлуктуационные константы.

**Библиографический список**

1. Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тех. М.: Наука, 1974. 560 с.
2. Ярцев В.П., Киселева О.А. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации: учебное

пособие. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2009. 124 с.

3. Дранников Р.Н., Ерофеев А.В., Горохов Т.И. Определение исходных данных для расчета термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова поливинилхлоридных плит // Современная наука: теория, методология, практика: II Всероссийская (Национальная) научно-практическая конференция, 28–29 мая 2020 г. Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2020. С. 116–119.

## INFLUENCE OF THE VALUE OF THE POLE SHIFT OF DIRECT TEMPERATURES ALONG THE AXIS $\sigma$ ON THE THERMAL FLUCTUATION CONSTANTS OF THE GENERALIZED ZHURKOV EQUATION

**Gorokhov T.I., Erofeev A.V., Danilov V.M.**

***Abstract.** In article results of influence of shift of a pole of direct temperatures are given in  $lgt$  coordinates –  $\sigma$  on abscissa axis on the thermofluctuation constants entering Zhurkov's equation. Based on the analysis of the obtained constants for twenty artificial beams, diagrams of the dependence of the change in the constant  $U_0$  on the value of the pole offset relative to the base beam are made.*

***Keywords:** durability, prediction, polyvinyl chloride, thermofluctuation, Zhurkov's equation.*

Об авторах:

ГОРОХОВ Тимофей Иванович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: gorohowt@yandex.ru

ЕРОФЕЕВ Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций зданий и сооружений, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: av.erofeev@yandex.ru

ДАНИЛОВ Владислав Михайлович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: vm.danilov1997@gmail.com

About the authors:

GOROKHOV Timofey Ivanovich – Master Student, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: gorohowt@yandex.ru

EROFEEV Alexander Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of Buildings and Structures, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: av.erofeev@yandex.ru

УДК 691-415

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫХ КОНСТАНТ  
ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ЖУРКОВА  
ДЛЯ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНЫХ ПЛИТ СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ**

**Данилов В.М., Ерофеев А.В., Горохов Т.И.**

© Данилов В.М., Ерофеев А.В.,  
Горохов Т.И., 2021

***Аннотация.** В статье определены исходные данные для расчета термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова для поливинилхлоридных плит составного сечения в два слоя без специальных связей посредством статической обработки результатов натурных экспериментов. Дано описание методологии проведения экспериментов.*

***Ключевые слова:** долговечность, прогнозирование, поливинилхлорид, термофлуктуация, уравнение Журкова.*

Для строительных материалов характерна зависимость прочности от температурно-временного эффекта. Другими словами, они имеют термофлуктуационную природу, т. е. тепловое движение атома материала является катализатором процесса разрушения и деформирования. Механические воздействия лишь ускоряют названные процессы, которые являются вероятностными, так как время особой роли не играет, оно повышает количество тепловых флуктуаций, разрушающих связи в материале, препятствующие наступлению критической фазы [1].

Поливинилхлорид (ПВХ) – это искусственно синтезированный полимерный термопластичный материал. В зависимости от условий образуются продукты различной степени полимеризации с отличающимися физико-химическими свойствами [2]. Для проведения опытов был принят материал ПВХ FS-Roam плотностью  $0,55 \text{ г/см}^3$ .

Образцы испытываемых материалов в плане имеют прямоугольную форму (рис. 1) с размерами:  $L_0 = 60 \text{ мм}$  – длина образца,  $h = 3 \text{ мм}$  – высота образца,  $b = 15 \text{ мм}$  – ширина образца. Данный материал не проявляет явных анизотропных свойств, поэтому плоскость нагружения не имеет критической разницы. В нашем случае образец располагается в горизонтальной плоскости. Для получения составного сечения образцы складывались в два слоя без применения специальных связей.

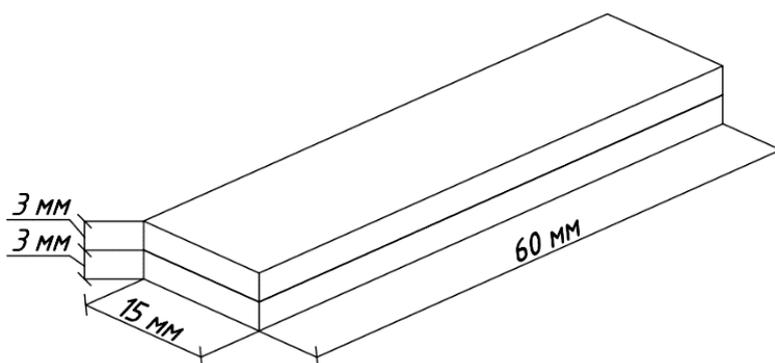


Рис. 1. Образец для проведения опытов

Для проведения испытаний на поперечный изгиб и разрушение использовался шестипозиционный стенд (рис. 2), который состоит из рамы (1), выполненной из швеллеров, а на опорной площадке (2) установлены две роликовые опоры (3) на расстоянии друг от друга, равном пролету балки – 50 мм. Образец (4) помещается на роликовые опоры и нагружается с помощью грузового устройства (5). Повышенная температура создается стержневыми электронагревателями (6). Для снижения теплотерь и создания направленного теплового потока на опорную площадку установлен и закреплен на раме кожух (8). Температура задается автотрансформатором ЛАТР 1М 220В 9А (7), регулируется потенциометром ЭПВ 2-11А гр. ХК 0–300 °С и дополнительно контролируется термометром с точностью  $\pm 1$  °С. Следует отметить, что термометра и шарик термометра расположены в зоне разрушения рабочего участка образца.

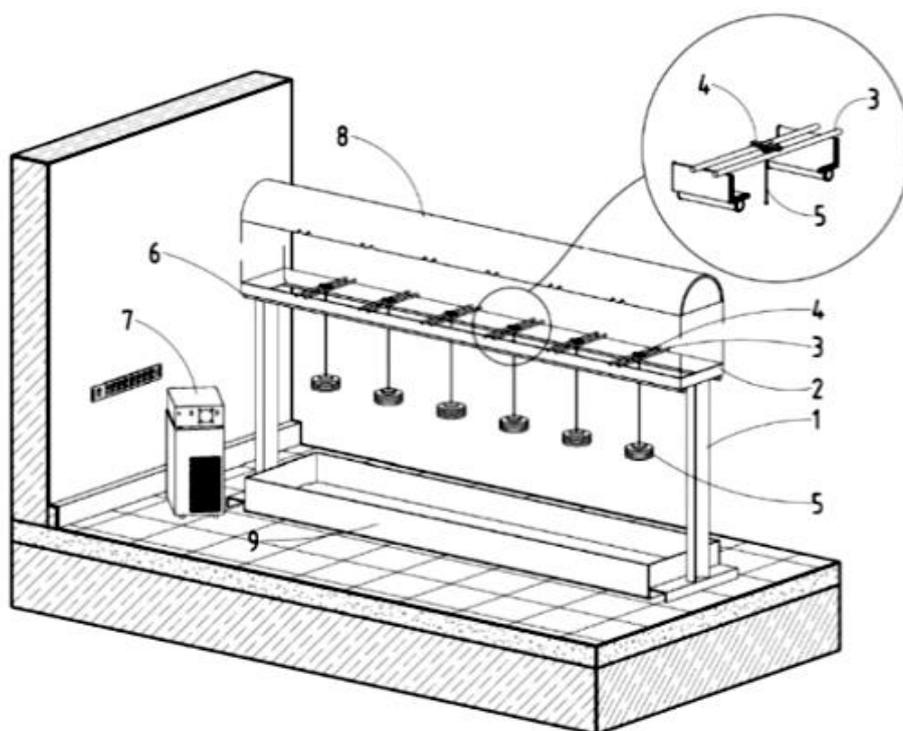


Рис. 2. Шестипозиционный стенд для проведения опытов

Для устранения механических колебаний при разрушении образцов использовалось демпфирующее устройство – емкость, заполненная песком (9).

Все испытания на разрушение поперечным изгибом проводились при трех значениях температуры (15, 30, 45 °С) в два этапа. Поскольку перед испытанием образцы должны иметь ту же температуру, то до момента ее достижения они находились в помещении под кожухом несколько часов [3].

На первом этапе необходимо было определить разрушающее напряжение. Для этого восемь образцов помещались на испытательную секцию установки и ступенчато нагружались до полного разрушения. В процессе экспериментов фиксировалась максимальная разрушающая нагрузка, выдерживаемая материалом.

Второй этап был направлен на определение долговечности, для чего фиксировалось время от момента начала нагружения неразрушающей нагрузкой ( $\sigma_{cp} = 0,95; 0,93; 0,91; 0,89; 0,87$ ) до разрушения образца. Полученные результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментально определенные значения  
десятичного логарифма времени  $lg\tau$  (с)  
при заданных напряжениях и температурах (в два слоя)

Характеристика	Значение				
$T, ^\circ C$	15				
$\sigma, \text{МПа}$	15,560	15,232	14,905	14,577	14,249
$lg\tau$	0,602	1,000	1,602	2,954	3,671
	0,477	1,342	1,863	2,908	3,651
	0,778	1,000	1,653	3,179	3,669
	0,477	0,477	1,568	3,384	3,778
	0,301	0,301	1,398	3,412	3,439
	0,699	1,176	1,756	3,300	3,801
	0,602	0,778	1,785	2,694	3,794
	0,699	0,903	1,740	2,957	3,651
$lg\tau_{cp}$	0,579	0,872	1,671	3,098	3,682
$T, ^\circ C$	30				
$\sigma, \text{МПа}$	15,160	14,841	14,522	14,203	13,884
$lg\tau$	0,477	0,903	1,146	2,100	3,168
	0,301	0,699	1,176	1,875	3,144
	0,477	0,954	1,826	2,666	2,916
	0,301	0,301	1,146	2,253	3,239
	0,602	0,602	0,954	1,875	3,438
	0,301	0,477	1,531	1,919	3,567
	0,477	0,301	0,699	1,531	3,055
	0,301	0,477	0,778	2,057	3,081
$lg\tau_{cp}$	0,405	0,589	1,157	2,035	3,201
$T, ^\circ C$	45				
$\sigma, \text{МПа}$	14,580	14,273	13,967	13,660	13,353

Окончание табл. 1

Характеристика	Значение				
	$lgt$	0,000	0,699	1,230	1,813
0,301		0,301	0,845	2,021	2,776
0,477		0,845	0,778	1,653	2,683
0,301		0,301	0,699	1,613	2,884
0,000		0,845	1,041	1,519	2,720
0,477		0,477	1,279	1,973	2,894
0,301		0,699	0,845	2,107	2,777
0,301		0,301	0,903	1,653	3,027
$lgt_{cp}$	0,270	0,559	0,953	1,794	2,790

На основе данных из табл. 1 была проведена статическая обработка по ГОСТ Р 8.736-2011. Результат обработки представлен в табл. 2.

Таблица 2

Значения десятичного логарифма времени  $lgt$  (с)  
при заданных напряжениях и температурах  
после статистической обработки данных

$\sigma$ , МПа	$lgt$ при $T = 15\text{ }^\circ\text{C}$			$\sigma$ , МПа	$lgt$ при $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$			$\sigma$ , МПа	$lgt$ при $T = 45\text{ }^\circ\text{C}$		
	Н	Ср	В		Н	Ср	В		Н	Ср	В
15,560	0,251	0,579	0,908	15,160	0,117	0,405	0,692	14,580	-0,088	0,270	0,628
15,232	0,380	0,872	1,364	14,841	0,172	0,589	1,007	14,273	0,147	0,559	0,970
14,905	1,350	1,671	1,992	14,522	0,645	1,157	1,669	13,967	0,568	0,953	1,337
14,577	2,673	3,098	3,523	14,203	1,553	2,035	2,516	13,660	1,404	1,794	2,184
14,249	3,395	3,682	3,969	13,884	2,817	3,201	3,586	13,353	2,471	2,790	3,108

Примечание. Н – нижний предел; Ср – среднее значение; В – верхний предел.

Полученные результаты являются исходными данными для дальнейшего определения термофлуктуационных констант.

### Библиографический список

1. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тех. М.: Наука, 1974. 560 с.
2. Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниэлс Ч. Поливинилхлорид / под ред. Г.Е. Заикова; пер. с англ. СПб.: Профессия, 2007. 728 с.
3. Ярцев В.П., Киселева О.А. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации: учебное пособие. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2009. 124 с.

# DETERMINATION OF INITIAL DATA FOR CALCULATION OF THERMAL FLUCTUATION CONSTANTS OF GENERALIZED ZHURKOV'S EQUATION FOR POLYVINYL CHLORIDE PLATES OF COMPOSITE SECTION

**Danilov V.M., Erofeev A.V., Gorokhov T.I.**

***Abstract.** The article defines initial data for calculation of thermo-fluctuation constants of generalized Zhurkov equation for polyvinyl chloride plates of composite section into two layers without special bonds by static processing of results of full-scale experiments. This article also provides a description of the experimental methodology.*

***Keywords:** durability, prediction, polyvinyl chloride, thermofluctuation, Zhurkov's equation.*

Об авторах:

ДАНИЛОВ Владислав Михайлович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: vm.danilov1997@gmail.com

ЕРОФЕЕВ Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций зданий и сооружений, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: av.erofeev@yandex.ru

ГОРОХОВ Тимофей Иванович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: gorohowt@yandex.ru

About the authors:

DANILOV Vladislav Mikhailovich – Master Student, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: vm.danilov1997@gmail.com

EROFEEV Alexander Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of Buildings and Structures, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: av.erofeev@yandex.ru

GOROKHOV Timofey Ivanovich – Master Student, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: gorohowt@yandex.ru

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПО РАСЧЕТУ ТЕПЛОПОТЕРЬ И ЗАТРАТ НА ОТОПЛЕНИЕ КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНЫХ И БРУСОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Кузнецов В.А., Ярцев В.П.

© Кузнецов В.А., Ярцев В.П., 2021

*Аннотация.* В статье приведена модель разрабатываемой программы по расчету теплопотерь и затрат на отопление каркасно-панельных и брусовых сооружений в различных климатических условиях. Проведен подробный анализ модели программы. Введен коэффициент погрешности монтажа и рассчитаны затраты на отопление. Исследуемые объекты разработаны с применением новейших программных обеспечений проектирования (Cadwork, Auto Cad, Archi Cad и т. д.).

*Ключевые слова:* модель, конструктивное решение, программа, коэффициент погрешности монтажа, сопротивление теплопередаче.

Проблема создания и эксплуатации современного здания состоит в том, что в большинстве случаев на стадии проектирования не учитывается идея энергоэффективности. В связи с этим создаваемые в здании климатические системы по-прежнему не соответствуют современным стандартам энергосбережения.

В настоящее время главными направлениями повышения энергосбережения являются внедрение принципиально новых типов конструкций зданий, а также использование эффективных теплоизоляционных материалов.

Выбор рационального конструктивного решения на стадии проектирования связан с проблемой исследования процессов теплообмена, прогноза температурно-влажностного режима ограждающих конструкций и повышения точности теплотехнических расчетов, поскольку температурно-влажностный режим ограждений непосредственно влияет на микроклимат помещений, теплозащитные свойства, надежность и экологическую безопасность зданий.

Таким образом, проблема энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий приводит к необходимости исследования процессов теплообмена и разработки методов расчета теплопотерь ограждающих конструкций.

Целью данной статьи является создание модели программы по расчету теплотехнических потерь и затрат на отопление каркасно-панельных

и брусовых сооружений с внедрением коэффициента погрешности монтажа в процентном соотношении.

На начальном этапе создания программы необходимо:

1) обозначить страну, регион и населенный пункт, в котором будет строиться здание. Исходя из того или иного места строительства, в соответствии с СП 131.13330.2018 «Строительная климатология» [1] определить основные климатические параметры (температуру холодной пятидневки, продолжительность отопительного периода, среднюю температуру воздуха отопительного периода, относительную влажность воздуха наиболее холодного месяца, условия эксплуатации помещения, количество градусо-суток отопительного периода), а также средние месячные и годовые значения температуры и парциального давления водяного пара;

2) в жилом помещении задать тип той или иной конструкции (стена, цокольная плита, плита перекрытия);

3) задать климатические параметры (температуру, влажность) внутри и снаружи помещения;

4) обозначить слои конструкции с их толщинами.

После ввода данных программа автоматически будет выстраивать на схеме стеновой конструкции (рис. 1) диаграмму точки росы и температурную диаграмму, а также определять сопротивление теплопередаче [2].

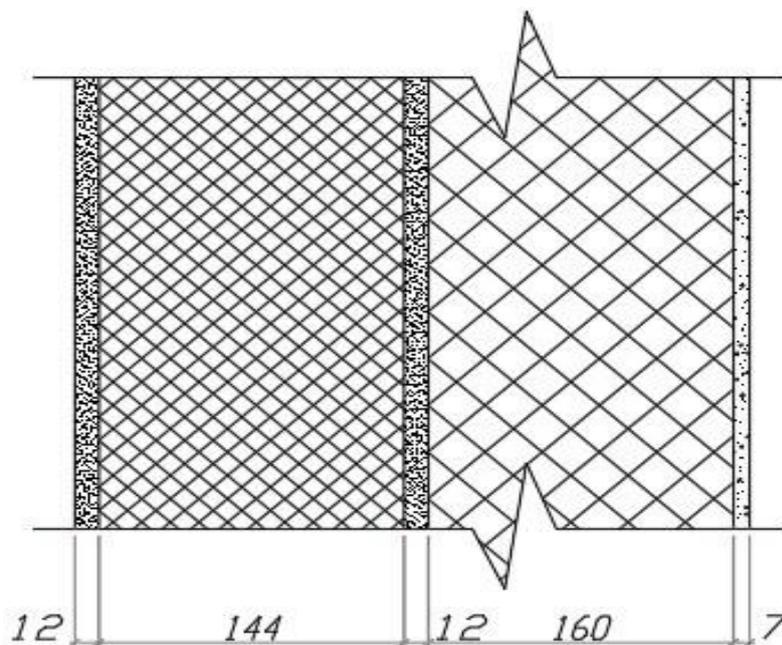


Рис. 1. Стеновая конструкция

На следующем этапе программных расчетов на базе энергетического паспорта здания [3, 4] необходимо определить общие теплопотери в год.

Помимо вводимых данных, необходимо добавить площадь ограждающих конструкций здания (пола, наружных стен, окон, дверей, потолка). Также, согласно СП 131.13330.2018 «Строительная климатология», зада-

ются коэффициенты теплосопротивления ограждающих конструкций. Программа автоматически будет рассчитывать теплопотери ограждающих конструкций при холодной пятидневке (рис. 2).



Рис. 2. Теплопотери ограждающих конструкций

Далее следует ввести данные по общему воздухообмену здания и, исходя из СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [5], рассчитать минимальный расход наружного воздуха на одного или нескольких человек. Программа автоматически высчитывает потери на вентиляцию сооружения. Также необходимо указать коэффициент качества (погрешности монтажа) в процентном соотношении, который можно рассчитать несколькими способами:

1. Самостоятельно задать погрешность монтажа для грубых расчетов.
2. Использовать технологию Blower Door – ветровую, вентиляторную дверь. Это диагностическое специальное оборудования, предназначенное для измерения герметичности зданий, оценивает уровень воздухопроницаемости помещения за счет оценки уровня потери давления в здании. Потери воздуха доказывают наличие погрешности монтажа в конструкции здания, что в итоге сказывается на энергосберегающем состоянии здания. Показатель при некой разнице давлений должен быть лучше нормативного по ГОСТ 31167-2009 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях» [6].
3. Провести опыты и исследование при помощи тепловизора. Взять за основу «идеально смонтированный дом» без погрешностей и щелей, т. е. сооружение без тепловых потерь, и этот же дом, но с максимальными потерями, щелями, зазорами и т. д.

Далее это здание, уже смонтированное на участке, проверить тепловизором, сделать расчет и суммировать тепловые потери на все здание целиком. Затем методом интерполяции вывести примерный процент погрешности монтажа конструкции. Однако полученные данным способом вычисления могут быть неточными.

В результате программа автоматически посчитает отопительную мощность при холодной пятидневке и общие теплопотери в год.

Итогом станет расчет стоимости затрат на отопление за отопительный период для шести различных видов топлива (электроэнергии, магистрального газа, сжиженного газа, дизельного топлива, дров и пеллетов). Необходимо ввести данные по тарифам за киловатт того или иного вида энергии. Программа автоматически представит результаты (в рублях) стоимости затрат на отопление в год. Данные наработки уже успешно применены в Excel и для построения диаграмм.

### **Библиографический список**

1. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Введ. 29.05.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 114 с.

2. Ярцев В.П., Кузнецов В.А. Расчет теплопотерь каркасно-панельного дома с утеплением austrotherm и отделкой из цементно-шлакового раствора // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. № 26. С. 133–139.

3. О требованиях энергетической эффективности зданий, строений, сооружений: приказ Министерства регионального развития Российской Федерации от 28 мая 2010 г. № 262. 2010. 9 с.

4. Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов: постановление Правительства РФ от 25 января 2011 г. № 18. 2011.

5. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Введ. 17.06.2017. М.: Стандартинформ, 2017. 104 с.

6. ГОСТ 31167-2009. Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях. Введ. 01.03.2011. М.: Стандартинформ, 2011. 19 с.

## **DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR CALCULATING HEAT LOSSES AND COSTS FOR HEATING FRAME-PANEL AND TIMBERED HOUSES**

**Kuznetsov V.A., Yartsev V.P.**

***Abstract.** The article presents a model of the program for calculating heat loss and heating costs for frame-panel and timbered houses in various climatic conditions. Detailed analysis of the program model is given. The installation*

*error factor is introduced and the heating costs are calculated. The objects under study were developed using the latest design software (Cadwork, Auto Cad, Archi Cad, etc.).*

**Keywords:** *model, constructive solution, program, installation error factor, heat transfer resistance.*

Об авторах:

КУЗНЕЦОВ Владислав Андреевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: Kuznetsov\_Vladislav\_Andreevich@mail.ru

ЯРЦЕВ Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций зданий и сооружений, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», профессор, советник РААСН. Тамбов. E-mail: Jarcev21@rambler.ru

About the authors:

KUZNETSOV Vladislav Andreevich – Postgraduate Student, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: Kuznetsov\_Vladislav\_Andreevich@mail.ru

YARTSEV Viktor Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction of Buildings and Structures, Tambov State Technical University, Professor, Advisor to the RAASN. Tambov. E-mail: Jarcev21@rambler.ru

УДК 69.059.7

## **ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО ЗДАНИЯ ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ В Г. ДОМОДЕДОВО**

**Кульков С.А., Канаев О.В.**

© Кульков С.А., Канаев О.В., 2021

**Аннотация.** *В статье представлены результаты технического обследования реконструируемого здания отопительной котельной по типовому проекту ТП 903-1-25. Приведены результаты обследования и на их основе сформулировано заключение о техническом состоянии конструкций.*

**Ключевые слова:** *реконструкция, котельная, техническое обследование.*

Сегодня газовые котельные являются самой распространенной и неотъемлемой частью отопительной системы любой инфраструктуры. Причина такой востребованности заключается в том, что газ – достаточно

дешевое и экологически чистое топливо, которое при правильной эксплуатации безопасно для использования. Кроме того, современные газовые котельные могут быть как блочно-модульными (для установки в непосредственной близости от отапливаемого здания или на крыше), так и передвижными.

В то же время большинство котельных, построенных еще в 60-е гг. XX в., до сих пор используют другие виды топлива (мазут, уголь, твердое топливо и др.). Технологическое оборудование таких котельных изношено и морально устарело, хотя сами здания еще пригодны для использования, что и определяет необходимость их реконструкции или капитального ремонта и переоснащение современным оборудованием и топливом.

Объектом настоящего исследования является одноэтажное здание отопительной котельной с размерами в плане 24×34 м и высотой 11 м, построенное по типовому проекту ТП 903-1-25 в 1979 г. и расположенное в г. Домодедово. Фасады здания и план на отметке +0,000 м представлены на рис. 1–3.

Конструктивная схема здания – каркасная одноэтажная однопролетная. Несущим каркасом являются железобетонные сборные колонны сечением 400×400 мм, сборные железобетонные фермы пролетом 24 м и ребристые плиты покрытия размером 1,5×6,0 м в соответствии с ГОСТ 7741-55 «Плиты крупнопанельные армопенобетонные для покрытий производственных зданий» [1]. Фундаменты здания котельной под колонны – монолитные железобетонные стаканного типа. Стены уложены по рандбалкам, выполненным по серии КЭ-01-05. Наружные стены из силикатного кирпича М100 на цементно-песчаном растворе толщиной 380 и 510 мм.



Рис. 1. Фасад здания по оси Д

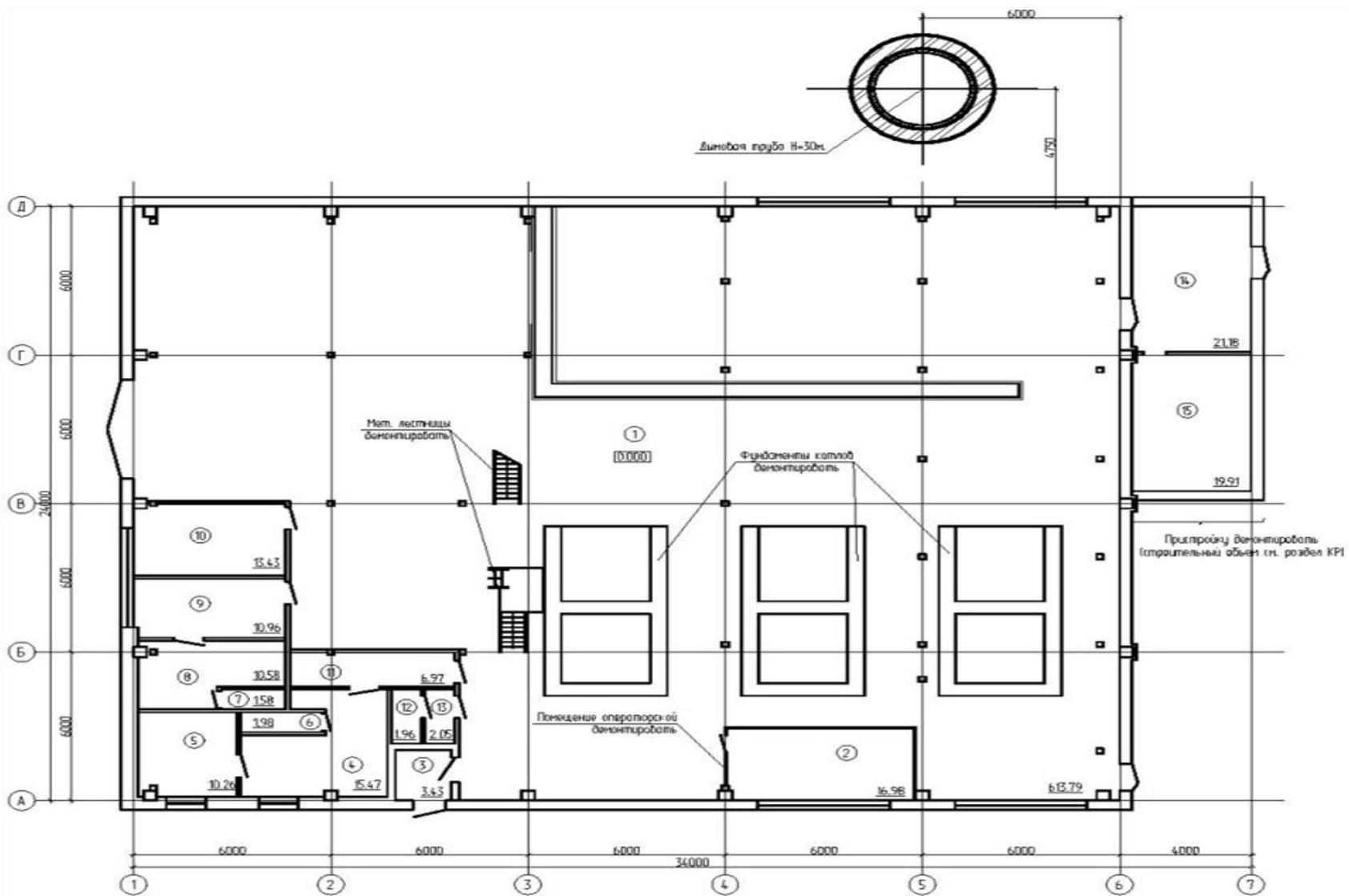


Рис. 2. План здания на отметке +0,000 м



Рис. 3. Фасад здания по осям 1 и А

Геометрическая неизменяемость каркаса, его несущая способность и жесткость в продольном направлении, а также устойчивость колонн из плоскости рам обеспечиваются жестким сопряжением колонн с фундаментами и жесткостью связей, покрытия – сплошным диском, образованным железобетонными плитами и фермами.

Реконструкция отопительной котельной выполняется в связи с необходимостью увеличения тепловой мощности и переоснащения новым технологическим оборудованием под газовое топливо. Также в ходе реконструкции по данным обследования предусматриваются мероприятия по усилению строительных конструкций здания, установка новой дезодорирующей трубы башенного типа с навеской легких газоходов типа «сэндвич» и демонтаж существующей кирпичной дымовой трубы.

Техническое обследование здания котельной проводилось с целью оценки:

технического состояния здания в соответствии с требованиями нормативных документов;

соответствия объекта экспертизы предъявляемым к нему требованиям промышленной безопасности.

Задачей технического обследования здания является проверка на соответствие здания предъявляемым к нему требованиям промышленной безопасности, определение технического состояния строительных конструкций в целом, оценка эксплуатационной надежности, выявление необходимости выполнения ремонтных или восстановительных работ и их объем.

Обследование проводилось визуальным и инструментальным методами с фотофиксацией дефектов и повреждений, контрольными замерами геометрических параметров сборных железобетонных элементов и кирпич-

ной кладки. При обследовании производился осмотр конструкций стен, несущих элементов каркаса, покрытия и кровли.

Визуально-инструментальный контроль конструктивных элементов здания котельной производился в объеме программы комплексного обследования с целью выявления видимых деструктивных явлений: дефектов, механических повреждений, трещин, коррозионного и эрозионного износа.

Визуальное обследование производилось в соответствии с п. 5.1.7 [2] с фотофиксацией дефектов.

Инструментальное обследование здания проводилось с помощью:  
измерителя прочности строительных материалов ИПС-МГ4.03;  
комплекта для визуально-измерительного контроля ВИК;  
лазерного дальномера BOSCH GLM 250 VF Professional.

По результатам визуально-инструментального контроля состояние строительных конструкций на момент проведения обследования оценивается, согласно [4], как ограниченно работоспособное.

Уровень шума измерялся шумомером НТ 154, максимальный уровень составил  $L = 51$  дБ, что не превышает допустимого значения 72 дБ.

Инструментальные измерения динамического состояния строительных конструкций производились виброметром Вибротест-МГ4. В результате замеров и анализа эксплуатационных динамических нагрузок строительных конструкций здания согласно РД 34.21.306-96 динамических нагрузок на строительные конструкции выявлено не было.

По итогам визуально-инструментального контроля вентиляционных систем здания, дефектов и повреждений конструкции вентиляции не обнаружено. В помещении котельного зала вентиляция находится в работоспособном состоянии и обеспечивает в час трехкратный воздухообмен.

Согласно [3], здание котельной относится к производственному помещению со зрительной работой VIII (б) разряда. Нормируемая освещенность для VIII (б) разряда зрительной работы составляет 75 лк. В соответствии с замерами, произведенными фотоэлектрическим люксметром ТКА-ЛЮКС, освещенность является достаточной и соответствует характеру зрительной работы.

Также в составе работ было выполнено приборное определение прочностных характеристик несущих элементов конструкции. В качестве прибора неразрушающего метода обследования использовался ИПС-МГ4.03. Методика измерений выбрана в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора. Выявлено, что прочностные характеристики несущих элементов конструкций здания соответствуют проектным данным.

Результаты обследования с фиксацией дефектов и повреждений, а также состав ремонтно-восстановительных работ представлен в таблице.

Ведомость дефектов и повреждений с рекомендациями по их устранению

Дефект или повреждение, размер дефекта	Расположение в осях	Ремонтно-восстановительные работы
Трещина в кирпичной кладке, $L = 2,66$ м, $V_{\text{макс}} = 5$ мм	В/1	Инъецировать трещину цементно-песчаным раствором состава 1:3 на расширяющемся цементе под давлением до 0,25 МПа и проводить наблюдение за трещиной
Трещина в кирпичной кладке, $L = 3,5$ м, $V_{\text{макс}} = 6$ мм	А/1, Д/1, А/6, Д/6	Инъецировать трещину цементно-песчаным раствором состава 1:3 на расширяющемся цементе под давлением до 0,25 МПа и выполнить усиление угла стен
Разрушение покрытия пола, $S = 19,09$ м <sup>2</sup>	Б-В/2-3	Восстановить покрытие пола на поврежденных участках керамической плиткой
Скол защитного слоя бетона в опорной зоне плиты покрытия с оголением арматуры, $L = 12,15$ пог. м	Д-Б/4-6	Расчистить поврежденную поверхность бетона плит покрытия до бетона с рН <sup>3</sup> 12, увлажнить и обетонировать полимербетоном, в частях по массе: эпоксидная смола – 100; каменноугольный лак – 100; жидкий тиокол – 20; отвердитель ПЭПА-5 – 10; цемент – 100–150
Скол защитного слоя бетона в опорной зоне плиты покрытия с оголением арматуры, $L = 654$ пог. м	Д-Б/4-6	
Следы протечек на плитах покрытия, $S = 1,9$ м <sup>2</sup>	В-Г/3-6	Выполнить дополнительную гидроизоляцию в местах прохода вентиляционных шахт через кровлю
Отсутствует герметизация межплитных швов, $L = 654$ пог. м	А-Д/1-6	Выполнить герметизацию межплитных швов
Разрушение кирпичной кладки, $V < 1$ м <sup>3</sup>	А/2-3	Выполнить переборку поврежденного участка стены с восстановлением подоконника
Отсутствие отлива дверного проема, $L = 0,5$ пог. м	А-Б/6	Выполнить отлив дверного проема из цементного раствора 1:2 с железнением поверхности
Рассыхание дверной коробки, $L = 4,85$ пог. м	А-Б/6	Выполнить замену дверной коробки вместе с дверным полотном
Разрушение защитного слоя бетона продольного ребра плиты покрытия со значительной коррозией продольной арматуры, $L < 1$ пог. м	В-Г/5-6	Выполнить усиление поврежденных плит покрытия

## Окончание таблицы

Дефект или повреждение, размер дефекта	Расположение	Ремонтно-восстановительные работы
Разрушение внутренней отделки, $S = 5,8 \text{ м}^2$	В-Д/1, Д/1-3	Окрасить известковым раствором поврежденные участки внутренней поверхности стен
Замачивание кирпичной кладки, $S = 19,46 \text{ м}^2$	А/1-6, Г/1-7	Выполнить наружную гидроизоляцию стен (от существующей горизонтальной гидроизоляции стен до верха отмостки)
Разрушение кирпичной кладки, $S = 1,1 \text{ м}^2$	А/5	Зачистить поврежденные участки наружной поверхности стен от слабого кирпича и оштукатурить цементно-песчаным раствором
Следы биологической коррозии на отмостке, локально по периметру здания	А-Д/1-7	Удалить следы биологической коррозии с отмостки и инъектировать цементно-песчаным раствором деформационный шов между отмосткой и стеной здания
Наклонные трещины в опорной зоне плиты покрытия, $V = 1 \text{ мм}$	В-Г/5-6	Выполнить усиление по расчету наклонных сечений, заделать трещины

Примечание.  $S$  – площадь дефекта;  $L$  – длина дефекта;  $V$  – ширина раскрытия.

Таким образом, на основании данных технического обследования строительных конструкций можно сделать вывод о том, что здание котельной пригодно для дальнейшей эксплуатации при условии проведения ремонтно-восстановительных работ по выявленным дефектам и повреждениям.

### Библиографический список

- ГОСТ 7741-55. Плиты крупнопанельные армопенобетонные для покрытий производственных зданий. М.: Изд-во стандартов, 1963. 29 с.
- ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014. 59 с.
- СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*. М.: Минрегион России, 2011. 74 с.
- ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014. 59 с.

# ENGINEERING AND TECHNICAL INSPECTION OF THE RECONSTRUCTED BUILDING OF THE HEATING BOILER HOUSE IN DOMODEDOVO

**Kulkov S.A., Kanaev O.V.**

***Abstract.** The article presents the results of the technical survey of the reconstructed building of the heating boiler house according to the standard project TP 903-1-25. The data of the survey are presented and on their basis the conclusion about the technical condition of the examined structures is formulated.*

***Keywords:** reconstruction, boiler room, technical inspection.*

Об авторах:

КУЛЬКОВ Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь.

КАНАЕВ Олег Владимирович – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: olejkanaev@yandex.ru

About the authors:

KULKOV Sergey Alekseevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver.

KANAEV Oleg Vladimirovich – Master Student of the Department of the Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver. E-mail: olejkanaev@yandex.ru

УДК691.32

## ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИИ ЧАСТИЦ И АКТИВНОСТИ ЦЕМЕНТА И ДОБАВОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСТВОРОВ И БЕТОНОВ

**Куляев П.В., Сизов Ю.В.**

© Куляев П.В., Сизов Ю.В., 2021

***Аннотация.** Матрица, заполнитель и связь между ними влияют на прочность и долговечность бетона. Матрица микродисперсных частиц состоит из цемента, воды затворения, ультрадисперсных частиц в*

*заполнителя, присадок и добавок. Это зависит не только от водоцементного соотношения, но и от гранулометрии и реакционной способности мелких частиц, а именно цемента и добавок. Поэтому для оптимизации матрицы в статье было исследовано влияние гранулометрии мелкодисперсных частиц, дан сравнительный анализ растворов с гранулированным шлаком, известняковой мукой и золой-уноса в качестве компонентов цемента, а также кремнеземной и кварцевой мукой в качестве добавок. Повышая тонкость и оптимизируя гранулометрию мелких частиц путем согласования кривых гранулометрического распределения частиц при достаточной надежности промышленного производства на цементном заводе, можно оказать решающее воздействие на способность матрицы обеспечивать прочность и, следовательно, на прочность раствора и бетона.*

**Ключевые слова:** *гранулометрия частиц, добавки, эффект паффинга, нанокремнеземный пафф.*

Прочность и долговечность бетона определяются свойствами матрицы (состоящей из цемента, воды затворения, добавок и примесей), свойствами заполнителя и связью между ними. Свойства матрицы и связи между заполнителем и матрицей зависят от эффективного соотношения вода/цемент, а также реакционной способности, формы частиц и гранулометрического состава цемента и добавок. В данной работе термины «форма частиц» и «распределение частиц по размерам» охватываются понятием «гранулометрия». Для оптимизации свойств матрицы необходимо учитывать не только цемент и его состав, но и добавки к бетону и, если это применимо, ультрадисперсную фракцию (с диаметром частиц меньше 125 мкм) заполнителя. Процентное содержание цемента и различных добавок в бетоне, а также эффективное соотношение воды и цемента устанавливаются в относительно узких пределах в существующих нормах в соответствии с требованиями прочности и долговечности. Эти составы обычно оптимизируются через различные испытания.

Мелкие частицы можно разделить на инертные и реакционно-способные в зависимости от их действия в бетоне. К практически инертным веществам относятся каменная мука и ультрадисперсная фракция заполнителя. По существу, эти вещества обладают только физическим действием наполнителя, т. е. заполняют пустоты между более крупными частицами [1]. Ускорение начальной гидратации цемента, связанное с эффектом паффинга наполнителя, наблюдается также с инертными мелкими частицами с очень большой тонкостью помола в результате дополнительных реакционных ядер. В дополнение к физическому действию наполнители цементов, а в малой степени и реакционноспособные добавки к бетону, обеспечивают микроструктуру и прочность продуктов реакции за

счет их химической и минералогической реакционной способности. Во время гидратации они проникают в заполненные водой пустоты между твердыми частицами, химически связывают часть воды в продуктах гидратации и таким образом уменьшают пористость мелкодисперсной матрицы [2] и, возможно, зоны поверхности заполнителя [3].

Плотность упаковки и содержание пустот в растворах определяется распределением по размерам всех мелких частиц. Из-за процессов, связанных с производством или разработкой бетонов (дробление, помол), большинство мелких частиц имеют непрерывное распределение по размерам частиц, но смеси мелких частиц с различным распределением частиц по размерам также могут иметь прерывистую гранулометрию. В частности, было установлено, что количество пустот может быть уменьшено путем смешивания мелких частиц с различным распределением частиц [3]. Добавлением в цемент или бетон хорошо диспергированных тонкодисперсных компонентов (ультрадисперсных) можно не только добиться более плотной упаковки самого мелкодисперсного материала, но и уменьшить содержание пустот в непосредственной близости от зоны поверхности заполнителя (зоны контакта) [4]. Добавленные ультрадисперсные частицы не всегда находятся в требуемом диспергированном состоянии. При экспериментальном определении плотности упаковки они часто вызывают плохую компактацию (способность к уплотнению формы). Причиной этого являются межчастичные силы взаимодействия (например, электростатические, вандерваальсовы), которые не позволяют ультрадисперсным частицам прилегать близко друг к другу как в сухом состоянии (паффинг), так и в водно-ультрадисперсной суспензии.

При оценке реакционной способности необходимо учитывать химический и минералогический составы компонентов смеси. Информация о возможных химических реакциях для латентно-гидравлических или пуццолановых составляющих цемента и добавок пуццолановых бетонов может быть получена из анализа химического и минералогического составов. Были проведены исследования [5] механизмов реакции различных видов мелких частиц. Плотность и микроструктура мелкодисперсной матрицы представляют интерес с практической точки зрения. Влияние различных типов мелкодисперсных частиц на формирование микроструктуры матрицы описано ниже. В процессе гидравлической реакции портландцемента (гидратации) безводные клинкерные фазы превращаются в сложные гидраты. Продукты гидратации имеют только 0,001 среднего размера частиц цемента, что означает, что они лежат в нанометровом диапазоне, как и поры геля, оставшиеся между ними. При полной реакции около 28 % цементной массы и воды химически соединяются в продуктах гидратации и дополнительно около 12 % адсорбционно фиксируются в порах геля. При более высоких значениях водоцементного отношения количество воды, избыточное

для этого требования, остается несвязанным в затвердевшей цементной пасте и приводит к образованию капиллярной поровой структуры с размерами пор примерно от 0,1 до 100 мкм. Если кроме портландцементного клинкера присутствуют и другие реакционноспособные мелкие частицы, которые сами образуют формирующие прочность гидраты, т. е. химически соединяют воду, то эти вещества способствуют дальнейшему уменьшению капиллярной пористости и, следовательно, уплотнению микроструктуры. Исследования показывают, что бетоны, изготовленные из цементов с ультрадисперсным доменным шлаком, которые, помимо портландцементного клинкера, содержат в качестве другого основного компонента латентно-гидравлический доменный шлак, имеют более тонкую поровую структуру, чем портландцементные бетоны, с меньшей долей довольно крупных капиллярных пор и склонностью к паффингу – электризованной дымчатости. Поэтому по своему составу они обычно плотнее портландцементных бетонов. Одной из причин этого является более низкое содержание крупных кристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в микроструктуре матрицы и поверхностных зонах заполнителей этих бетонов. Смещение структуры в сторону более мелких пор в результате пуццолановой реакции наблюдается также при использовании угольной золы-уноса в качестве пуццолановой составляющей цемента или добавки бетона. Реакция грубых кристаллов портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с образованием микрокристаллических фаз CSH рассматривается как причина такого процесса. Особенно это характерно для бетонов с очень мелкими пуццолановыми добавками, например микрокремнеземом, обладающим значительно более высокой непроницаемостью, чем обычные бетоны, и связано, в частности, со значительным улучшением зоны контактной поверхности. В случае нормальных бетонов наблюдается повышенная концентрация в зоне поверхности контакта заполнителя хорошо кристаллизованного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и игл этtringита, выровненных по направлению к поверхности заполнителя, что повышает пористость композита по сравнению с окружающей матрицей. Пуццоланы, которые существенно тоньше цемента, с самого начала достигают более плотной упаковки частицы на поверхности заполнителя, что способствует образованию более плотных фаз CSH в этой зоне.

В ряде исследований [7, 8] изучалось влияние гранулометрии и реакционной способности цементных компонентов на прочность раствора и бетона. При заданном содержании клинкера развитие прочности растворов и бетонов возрастает в первую очередь с увеличением тонкости помола цементного клинкера. Для той же тонкости прочность более старого раствора увеличивается сильнее при более узком распределении частиц по размерам. В бетоне этот эффект может быть обнаружен только при низких соотношениях вода/цемент ( $\leq 0,45$ ). На прочность практически не влияет тонкость инертных составляющих цемента (известняка). С дру-

гой стороны, увеличивается воздействие на прочность латентно-гидравлических (доменного шлака) и пуццолановых (трасса, золы-уноса) составляющих цемента. Ниже отдельно рассматривается влияние гранулометрии и реакционной способности бетонных добавок на прочность раствора и бетона для различных типов мелкодисперсных частиц, исследованных в данной работе. На прочность почти не влияет каменная мука нормальной крупности. Она не оказывает большого воздействия на формирование микроструктуры и даже при очень тонкой обработке не вносит заметных изменений в прочность бетона [9].

При использовании золы-уноса прочность композита повышается в зависимости от увеличения крупности составляющего. В дополнение к тонкости пуццолановый эффект золы-уноса способствует формированию прочности в большем возрасте, т. е. от 28 до 56 дней. Эффект наполнителя тем больше, чем больше разница в тонкости между золой и цементом. Независимо от характеристик распределения частиц прочностной вклад золы-уноса в решающей степени определяется долей мелких частиц, которая меньше или равна 10 мкм. Наибольшие прочности в растворах и бетонах были измерены при использовании измельченной золы-уноса, в которой оптимальный уровень добавки оказался около 30–45 % по массе относительно цемента. Лучшая химическая реакционная способность этих частиц является причиной большой эффективности измельченной золы-уноса.

Более быстрое развитие прочности объясняется не только действием наполнителя, но и пуццолановой реакцией мелких частиц, которая протекает очень быстро. Помимо прочего, это проявляется в повышенном развитии температуры в течение первых нескольких дней по сравнению с чистыми цементными бетонами. В дополнение к уплотнению микроструктуры улучшение связи между заполнителем и окружающей мелкодисперсной матрицей также способствует повышению прочности бетона.

Эффективность микрокремнезема основана, наряду с «эффектом микронаполнителя», главным образом на очень быстрой и полной пуццолановой реакции высокорективного кремнеземного паффа, как было показано проведенным сравнением с инертными микронаполнителями. В результате более плотной и прочной матрицы и улучшения связи между заполнителем и матрицей оба механизма приводят к увеличению прочности. Существует небольшая разница в гранулометрических свойствах в паффе кремнезема, обычно используемом в качестве добавок к бетону, тонкость которого примерно в 100 раз выше, чем у цемента.

Значительное увеличение прочности может быть достигнуто при добавках от 5 до 25 % по массе. Дальнейшее увеличение тонкости кремнеземного паффа (нанокремнезема) до сих пор исследовалось только при небольших добавках до 5 % по массе. Несмотря на чрезвычайно большую

тонкость, было обнаружено лишь незначительное увеличение прочности по сравнению с обычным кремнеземом.

При смешивании бетона реактивная и инертная микро- и нанодисперсная фаза (цемент, добавки и ультрадисперсная фракция заполнителя) образует тесто при затворении водой, которая окружает более грубые зерна заполнителя, и в бетоне с плотной микроструктурой полностью заполняет пространства между зернами заполнителя. Смесь затвердевает в результате гидратации реакционноспособных компонентов, так что зерна заполнителя, внедренные в полученную матрицу, жестко соединяются друг с другом. Таким образом, прочность полученного бетона определяется в основном процентным соотношением компонентов по объему и свойствами матрицы (затвердевшего цемента, теста), свойствами заполнителя и связью между матрицей и заполнителем. Процентное соотношение компонентов по объему и свойства матрицы предопределяются количеством и составом теста. Как кривая гранулометрического состава заполнителя, так и объемы заполнителя и теста в растворах или бетонах в этих исследованиях поддерживались постоянными, чтобы исключить влияние количества теста. Исходной точкой была эталонная смесь с мелкодисперсной фракцией 100 об. %. Для оценки действия паффа, 25 об. % портландцемента заменяли на пафф ультрадисперсных добавок, подлежащих оценке. Это означало, что можно оценить как эффективность по отношению к эталонному цементу, так и различия в эффективности различных мелкодисперсных смесей. При испытании на прочность на сжатие призмы раствора хранились в течение 1 дня в закрытой пресс-форме, а во время испытаний – в воде. Для исключения влияния разницы в площади поверхности заполнителя между растворами и бетонами бетоны и растворы были изготовлены таким образом, чтобы заполнители были окружены слоем теста той же толщины.

При тех же толщине слоя теста и водоцементном соотношении раствор с максимальным размером заполнителя 5 мм имел содержание теста  $370 \text{ л/м}^3$ , а бетон с максимальным размером заполнителя 16 мм –  $300 \text{ л/м}^3$ . Содержание цемента в эталонных смесях составляло  $480 \text{ кг/м}^3$  для строительных растворов и  $390 \text{ кг/м}^3$  для бетонов. Следовательно, объемная доля мелкодисперсной матрицы, образующейся в растворе после затвердевания, выше в бетоне, таким образом, несмотря на равную толщину слоя теста, мелкие частицы могут иметь больший эффект в растворе, чем в бетоне. Из-за большей удельной поверхности строительного заполнителя это также верно для эффекта в зоне поверхности заполнителя.

### ***Заключение***

Обрабатываемость и прочностные характеристики определяются объемным процентом и составом теста или матрицы. Способность теста образовывать прочность зависит от гранулометрического состава мелкодисперсных частиц и их химического состава, физико-минералогической реактивности. Мелкими частицами с дымчатой структурой-паффом в тесте считаются все вещества с размерами частиц менее 125 мкм.

Описанные данные были использованы для расширения понимания взаимодействия гидравлических, латентно-гидравлических, пуццолановых и инертных составляющих цементного теста в зависимости от их гранулометрического состава. Растворы и бетоны изготавливались с одинаковой толщиной слоя пасты, а следовательно, и с одинаковым объемом теста, чтобы компенсировать влияние его количества. Паффы в исследуемых составах составляли 75 об. % цемента СЕМ I 32,5 R и 25 об. % гранулированного шлака, золы-уноса, известняка или кварцевой муки.

Влияние гранулометрии и реакционной способности составляющих теста на способность матрицы образовывать прочность и развитие микроструктуры строительных растворов и бетонов можно обобщить следующим образом: с увеличением заполнения пустот продуктами гидратации, т. е. увеличением плотности микроструктуры и утончением структуры пор матрицы, также происходит увеличение прочности раствора или бетона. Чем больше объем матрицы мелкодисперсных частиц по сравнению с объемом заполнителя, тем сильнее на прочность влияют гранулометрические свойства мелкодисперсных частиц.

Показано, что вклад прочности инертных мелкодисперсных частиц в результате действия физического наполнителя невелик по сравнению с вкладом в результате химического и минералогического действия реактивных мелкодисперсных частиц и практически не имеет значения в строительной практике.

Более высокие проценты инертных мелкодисперсных частиц приводили к снижению прочности, которое не могло быть компенсировано даже при использовании чрезвычайно тонких инертных порошков. Цементы СЕМ II/A-L, которые особенно широко используются из-за хороших характеристик обрабатываемости, достигают способности образовывать прочность, аналогичной для портландцементов, только благодаря оптимальному гранулометрическому соответствию основных компонентов.

Для одного и того же количества компонентов смеси основной вклад различных реактивных порошков становился больше с увеличением их тонкости и фактически значительно превышал небольшое их количество. Это объясняется большей площадью реакционной контактной поверхности, более быстрой и полной реакцией ультрамелких частиц и улучшением структуры зон с более высоким содержанием воды вокруг зерна

заполнителя. В пропорции 25 об. % пуццолановой и латентно-гидравлической составляющих цемента с тонкостью помола в 3–5 раз выше, чем у портландцементного клинкера, обеспечивался вклад в обеспечение прочности примерно на 10–20 % выше, чем у чистого портландцемента.

На ход реакции пуццолановых мелкодисперсных частиц решающее влияние оказывала тонкость помола. Цементные мелкодисперсные пуццолановые материалы (зола-унос) обеспечили заметный вклад в развитие прочности примерно через 3 месяца, но пуццолановые материалы с примерно в 5 раз более высокой тонкостью помола (пафф) оказали заметное влияние на прочность бетонов уже через 2 дня.

Желаемое техническое использование вышеуказанных эффектов гранулометрии и реакционной способности мелкодисперсных частиц на развитие прочности и микроструктуры раствора и бетона требует высокого уровня производственного контроля и обеспечения качества. Это может быть ожидаемо и экономически эффективно реализовано только в ходе промышленных процессов, например при производстве портландцементов на цементных заводах, работающих в соответствии с европейскими нормами DIN 1164.

### **Библиографический список**

1. Перониус Н., Свитинг Т.Дж. Корреляция минимальной пористости с распределением частиц по размерам // Порошковая технология. 2005. № 42. С. 113–121.
2. Лохер Ф.У. Цементная структура и свойства цементного камня // Энциклопедия технической химии. 2003. Т. 24. С. 565–568.
3. Бенц Д.П., Гарбочи Е.Я. Имитационные исследования влияния минеральных примесей на межфазную зону цементного теста-заполнителя // *ACI Materials Journal*. 1991. № 88. С. 518–529.
4. Оливье Ж.П., Мазо Дж.К., Бурдетт Б. Межфазная переходная зона в бетоне // *Современные материалы на цементной основе*. 1995. Т. 2. № 1. С. 30–38.
5. Одлер И., Хинрихс В. Исследование гидратации портландцементного шлакового цемента: состав, структура и свойства гидратированного материала // *Успехи в исследованиях цемента*. 1999. № 5. С. 15–20.
6. Рой Д.М., Малек Р.И. Гидратация шлакового цемента. Прогресс в цементе и бетоне // *Минеральные примеси в цементе и бетоне* / под ред. С.Н. Гоша. 1993. Т. 4. С. 84–117.
7. Вишерс Г., Ричардс В. Влияние компонентов и гранулометрии цемента на структуру цементного камня // *Бетон*. 1992. № 32. С. 337–341.
8. Шиллер Б., Эллерброк Х.-Г. Измельчаемость основных компонентов цемента и их влияние на энергетические затраты при измельчении и свойства цемента // *Цемент Известняк Гипс*. 1992. Т. 45. № 7. С. 325–334.

9. Спрунг С., Зибель Э. Оценка пригодности известняка для производства портлендского известнякового цемента (PKZ) // Цемент Известняк Гипс. 1991. Т. 44. №. 1. С. 1–11.

## EFFECT OF PARTICLE SIZE MEASUREMENT AND ACTIVITY OF CEMENT AND ADDITIVES ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MORTARS AND CONCRETES

Kulyaev P.V., Sizov Y.V.

***Abstract.** The matrix, the aggregate, and the bond between the matrix and the aggregate affect the strength and durability of the concrete. The micro-disperse matrix consists of cement, mixing water, ultra-disperse particles in the aggregate, additives. This depends not only on the water/cement ratio, but also on the granulometry and reactivity of small particles, namely cement and additives. Therefore, to optimize the matrix, the influence of fine particle granulometry was investigated. A comparative analysis of solutions with granular slag, limestone powder and fly ash as cement components, as well as silica and quartz fume as additives was given. By increasing the fineness and optimizing the granulometry of fine particles, which can only be achieved with sufficient reliability of industrial production in a cement plant by matching the particle size distribution curves, it is possible to have a decisive effect on the strength of the matrix forming capacity and, consequently, on the strength of the mortar and concrete.*

***Keywords:** particle granulometry, additives, puffing effect, nanosilicon-puff.*

Об авторах:

КУЛЯЕВ Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

СИЗОВ Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

About the authors:

KULYAEV Pavel Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

SIZOV Yuri Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

## **ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА**

**Нгуен Дык Винь Куанг, Александрова О.В., Булгаков Б.И.**

© Нгуен Дык Винь Куанг,  
Александрова О.В., Булгаков Б.И., 2021

***Аннотация.** В статье рассмотрено влияние золы-уноса (ЗУ), тонкомолотого кварцевого песка (кварцевой муки – КМ) и микрокремнезема (МК) на свойства бетона. Результаты экспериментов показали, что использование минеральных добавок в количестве 10 % МК и 40 % ЗУ для частичной замены сульфатостойкого портландцемента и частичной замены (20 %) мелкозернистого заполнителя на КМ увеличивают долговечность и прочность бетона.*

***Ключевые слова:** зола-уноса, микрокремнезем, тонкомолотый кварцевый песок, сульфатостойкий портландцемент, долговечность бетона, прочность бетона.*

В настоящее время во Вьетнаме идет индустриализация и модернизация страны. Наряду с растущим производством продукции, энергии и топлива, служащих развитию национальной экономики, развитие многих отраслей влечет за собой увеличение количества отходов. Таким образом, угольная теплоэнергетика является одним из основных источников отходов. В стране действует 21 тепловая электростанция (ТЭС). По данным Департамента промышленной безопасности и окружающей среды Министерства промышленности, вьетнамские ТЭС производят до 12,2 млн т угольной золы ежегодно, в то время как за год обрабатывают только 4 млн т. Для производства 1 кВт·ч электроэнергии с использованием угольной пыли будет выброшено от 0,9 до 1,5 кг угольной золы. Однако на сегодняшний день золы, используемой в качестве строительного материала, очень мало по сравнению с генерируемым количеством: используется около 10 %, а 90 % захоронено, что вызывает серьезное загрязнение окружающей среды, поэтому проблема утилизации золы на угольных станциях во Вьетнаме является актуальной. Объемы золы, перерабатываемой для производства строительных материалов, остаются очень скромными. Между тем при правильном подходе к переработке золы Вьетнам сможет сэкономить десятки миллионов тонн полезных ископаемых, а сотни гектаров земли будут очищены, поскольку угольные электростанции больше не будут нуждаться в площади для хранения отходов.

Основываясь на результатах анализа химических и физических свойств, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что образцы золы-уноса (ЗУ), взятые с ТЭС на севере Вьетнама, имеют химический состав, схожий с химическим составом ЗУ электростанций других стран мира.

Таблица 1

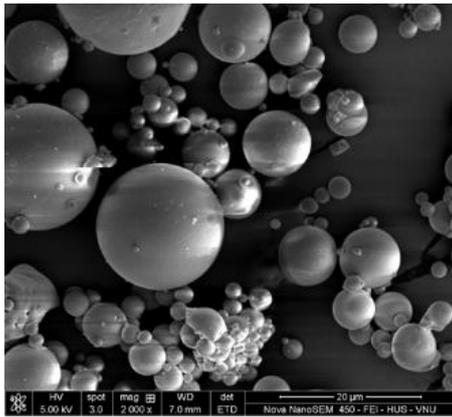
Химический состав ЗУ

Вещество	Результат анализа химического состава ЗУ (содержание % по массе)						
	Тепловые электростанции во Вьетнаме				Тепловые электростанции стран мира		
	«Фа Лай»	«Уонг Би»	«Монг Дуонг»	«Нинь Бинь»	Европа	Китай	Америка
SiO <sub>2</sub>	57,1–58,4	58,49	54,27	34,41–60,7	28,5–59,7	35,6–57,2	37,8–58,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,8–26,1	28,11	25,02	17,39–27,2	12,5–35,6	18,8–55,0	19,1–28,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7–7,2	6,11	4,71	4,8–5,61	2,6–21,2	2,3–19,3	6,8–25,5
CaO	0,7–0,81	0,82	0,91	0,4–1,21	0,5–28,9	1,1–7,0	1,4–22,4
MgO	1,16–1,2	1,10	1,22	0,8–1,11	0,6–3,8	0,7–4,8	0,7–4,8
Na <sub>2</sub> O	0,09–0,4	0,1	0,16	0,16–0,2	0,1–1,9	0,6–1,3	0,3–1,8
K <sub>2</sub> O	4,3–6,56	2,58	6,76	4,3–5,16	0,4–4,0	0,8–0,9	0,9–2,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0–0,13	–	0,16	0,08–0,16	0,1–1,7	1,1–1,5	0,1–0,3
TiO <sub>2</sub>	0–0,78	–	0,78	0,13–0,63	0,5–2,6	0,2–0,7	1,1–1,6
MnO	0–0,04	–	0,04	0,02–0,06	0,03–0,2	–	–
SO <sub>3</sub>	0,3	–	–	0,3	0,3	1,0–2,9	0,1–2,1
H <sub>2</sub> O	0–0,35	–	0,58	8,4–14,02	–	–	–
П. п. п.	4,36–16	≈ 45	5,24	8,1–16,91	–	–	0,2–11,0

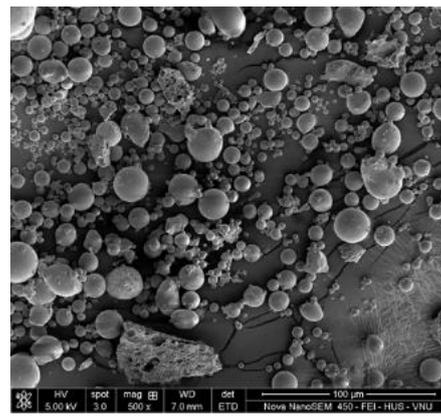
Примечание. П. п. п. – потери при прокаливании.

Целью исследования являлось изучение влияния ЗУ в качестве замены части цемента и тонкомолотого кварцевого песка (кварцевой муки (КМ)) как мелкого заполнителя (речного песка) на прочность на сжатие, прочность на осевое растяжение, прочность на растяжение при изгибе и долговечность бетона в возрасте 3, 7 и 28 суток.

При проведении исследований использовалась ЗУ ТЭС «Фа Лай», морфология частиц золы показана на рис. 1. Химический и минералогический составы ЗУ приведены в табл. 2. Рентгеноструктурный анализ подтверждает преобладание глинозема и кремнезема в составе зольной пыли ТЭС «Фа Лай». Образцы состоят из почти правильных сферических частиц диаметром 1–8 мкм.



а



б

Рис. 1. Микрофотографии ЗУ ТЭС «Фа Лай»:  
а – увеличение в 2 000 раз; б – увеличение в 500 раз

Таблица 2

Химический состав цемента и свойства минеральных добавок

Добавки	Компоненты, %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Кварцевый порошок	99,7	0,044	0,040	0,052	0,036	0,0067	0,020	0,044
Микрокремнезем	92,48	0,86	1,91	0,32	0,85	1,22	0,38	–
Зола-уноса	57,33	24,05	6,06	0,68	0,96	3,60	0,27	0,7
Цемент PCsr40	20,59	3,77	5,06	62,12	1,72	0,63	0,135	0,12
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	BaO	SO <sub>2</sub>	П. п. п.
Кварцевый порошок	–	–	–	–	–	–	–	0,042
Микрокремнезем	–	–	–	–	–	–	0,3	1,68
Зола-уноса	0,11	0,03	0,02	0,02	0,03	–	0,3	5,74
Цемент PCsr40	–	–	–	–	–	1,89	2	–

Еще одной целью исследования было изучение влияние ЗУ на прочность и долговечность бетона путем частичной замены цемента с 0, 20, 30 и 40 % ЗУ. Оптимальная дозировка КМ составляет 20 % (10 % размером 5 мкм и 10 % – 10 мкм) от количества мелкого заполнителя. Составы бетонной смеси и измеренные осадки различных партий бетона показаны в табл. 3.

Результаты исследований, приведенные в табл. 4, показывают, что при частичной замене в количестве 20 % мелкого заполнителя на КМ (в том числе 10 % размером 5 мкм и 10 % – 10 мкм) прочность на сжатие увеличилась на 7,5 % (на 3-и сутки), 16,1 % (на 7-е сутки) и 9,2 % (на 28-е сутки) при отверждении в нормальных условиях при изменении температуры 28–31 °С. Это возможно за счет увеличения доли мелкодисперсного наполнителя, повышающего плотность упаковки за счет заполнения пор. Тонкомолотый кварцевый песок действует как эффективный наполнитель при обычном отверждении в воде, а также как пуццолановая добавка при более высоких температурах.

Таблица 3

## Составы бетонной смеси

Обозначение смеси	Компоненты вяжущего, кг/м <sup>3</sup>			Заполнители, кг/м <sup>3</sup>				Вода, кг	Суперпластификатор, кг (%)	(Вяжущее + суперпластификатор) / вяжущее
	Цемент РС <sub>CR40</sub> , кг	Микрокремнезем, кг (%)	Золауноса, кг (%)	Крупный заполнитель, кг	Природный песок, кг	Кварцевая мука, кг (%)				
						5 мкм	10 мкм			
O <sub>1</sub>	550	–	–	1 088	621,7	–	–	156	9,9 (1,8)	0,30
O <sub>2</sub>	550	–	–	1 088	497,4	62,2 (10)	62,2 (10)	163	9,9 (1,8)	0,31
O <sub>3</sub>	412,5	27,5 (5)	110 (20)	1 088	621,7	0 (0)	0 (0)	156	9,9 (1,8)	0,30
O <sub>4</sub>	412,5	27,5 (5)	110 (20)	1 088	497,4	62,2 (10)	62,2 (10)	152	9,9 (1,8)	0,30
O <sub>5</sub>	385	55 (10)	110 (20)	1 088	497,4	62,2 (10)	62,2 (10)	156	9,9 (1,8)	0,30
O <sub>6</sub>	330	55 (10)	165 (30)	1 088	497,4	62,2 (10)	62,2 (10)	156	9,9 (1,8)	0,30
O <sub>7</sub>	275	55 (10)	220 (40)	1 088	497,4	62,2 (10)	62,2 (10)	156	9,9 (1,8)	0,30

Таблица 4

## Механические свойства бетона

Обозначение смеси	Цемент РС <sub>CR40</sub> , %	(Вяжущее + суперпластификатор) / вяжущее	Микрокремнезем, %	Золауноса, %	Кварцевая мука (% мелкого заполнителя)		Прочность на сжатие, МПа				Прочность на растяжении при изгибе, 28 суток, МПа	Прочность на осевое растяжение, 28 суток, МПа
					5 мкм	10 мкм	3 суток	7 суток	28 суток	56 суток		
O <sub>1</sub>	100	0,3	–	–	–	–	67,58	71,11	81,750	83,846	5,71	7,86
O <sub>2</sub>	100	0,3	–	–	10	10	72,62	82,56	89,246	91,534	5,98	9,17
O <sub>3</sub>	75	0,3	5,0	20	–	–	41,33	62,22	65,283	66,957	4,86	7,85
O <sub>4</sub>	75	0,3	5,0	20	10	10	52,44	75,97	81,812	83,910	5,72	8,78
O <sub>5</sub>	70	0,3	10	20	10	10	62,15	81,91	87,921	105,749	5,94	9,11
O <sub>6</sub>	60	0,3	10	30	10	10	69,32	74,96	90,764	109,169	6,07	9,35
O <sub>7</sub>	50	0,3	10	40	10	10	65,33	72,44	91,138	109,619	6,09	9,27

При исследовании влияния ЗУ на прочность бетона (см. табл. 4) видно, что прочность увеличивается постепенно, причем у бетона, содержащего золу, это происходит медленнее, чем у изготовленного без добавления ЗУ. Снижение прочности бетона на сжатие в возрасте 3 суток составило 16,84, 4,75 и 11,15 %, а в возрасте 7 суток – 0,8, 9,3 и 3,5 % в образцах, содержащих ЗУ в количестве 20, 30 и 40 % от массы цемента, что доказывает постепенное нарастание прочности бетона. Однако прочность на сжатие увеличивается медленнее, чем у контрольного образца.

Результаты испытаний на водопроницаемость, водопоглощение и истираемость бетона представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытаний на проницаемость, водопоглощение и истирание образцов бетона

Обозначение состава	Проницаемость на 28-е сутки, см/с	Водопоглощение за 24 ч, %	Сопротивление истиранию, мм
O <sub>1</sub>	$1,60 \cdot 10^{-10}$	2,50	0,836
O <sub>2</sub>	$1,18 \cdot 10^{-10}$	2,39	0,861
O <sub>3</sub>	$3,16 \cdot 10^{-10}$	3,23	1,079
O <sub>4</sub>	$1,21 \cdot 10^{-10}$	2,52	0,847
O <sub>5</sub>	$1,10 \cdot 10^{-10}$	2,43	0,874
O <sub>6</sub>	$1,03 \cdot 10^{-10}$	2,19	0,770
O <sub>7</sub>	$1,09 \cdot 10^{-10}$	2,33	0,843

По результатам испытаний можно сделать вывод, что прочность и долговечность бетона повышаются при частичной замене цемента минеральными добавками, такими как ЗУ, КМ и микрокремнезем.

Высокая прочность бетона на сжатие достигается при более высоком содержании вяжущего. Прочность бетона при частичной замене цемента ЗУ на 20, 30 и 40 % и микрокремнеземом на 10 %, а также частичной замене природного песка на 20 % КМ достигла 88, 91 и 92 МПа за 28 дней, а через 56 дней они достигли 106, 109 и 110 МПа. Приведенные значения констатируют, что эффективность комплексного вяжущего с точки зрения прочности на сжатие повышается с увеличением времени отверждения.

#### Библиографический список

1. Torli K., Kawamura M. Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack // Cement and Concrete Research. 1994. Vol. 24. Is. 2. P. 361–370. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90063-9
2. Shi Hui-Sheng Xu, Bi-Wan Zhou, Xiao-Chen. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. Is. 5. P. 1980–1985. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.021

3. Long G., Wang X., Xie Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Is. 4. P. 601–605. DOI: 10.1016/s0008-8846(01)00732-3
4. Sharfuddin A.M., Kayali O., Anderson W. Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods // *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol 30. Is. 7. P. 576–582. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.02.005
5. Shannag M.J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Is. 2. P. 658–662. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.025
6. Dotto J.M.R., Abreu A.G., Dal Molin D.C.C., Muller I.L. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behavior of reinforcement bars // *Cement and Concrete Composites*. 2004. Vol. 26. Is. 1. P. 31–39. DOI: 10.1016/S09589465(02)00120-8
7. Kocak Y. A study on the effects of fly ash and silica fume substituted cement paste and mortars // *Scientific Research and Essays*. 2010. Vol. 5. Is. 9. P. 990–998. URL: <https://academicjournals.org/journal/SRE/article-full-text-pdf/F4F0F5718906> (дата обращения: 19.01.2021).
8. Temiz H., Karakeci A. An investigation on microstructure of cement paste containing fly ash and silica fume // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Is. 7. P. 1131–1132. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00749-4

## **EFFECT OF MINERAL ADDITIVES ON PHYSICO-MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF CONCRETE**

**Nguyen Duc Vinh Quang, Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I.**

***Abstract.** In this study, the influence of fly ash (FA), quartz sand powder (QP) and silica fume (SF) on the properties of concrete. The result experimental indicates that the use of mineral admixtures included 10 % SF, 40 % FA to partial replacement of sulfate-resisting Portland cement and partial replacement of fine aggregate by 20 % QP respectively, improving both long term durability and strength of concrete.*

***Keywords:** fly ash, silica fume, quartz sand powder, sulfate-resisting Portland cement, durability of concrete, strength of concrete.*

Об авторах:

НГУЕН ДЫК ВИНЬ КУАНГ – аспирант, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: ndvquang@hueic.edu.vn

АЛЕКСАНДРОВА Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО

«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: aleks\_olvl@mail.ru

БУЛГАКОВ Борис Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: fakultetst@mail.ru

About the authors:

NGUYEN DYK VIN KUANG – Postgraduate Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow. E-mail: ndvquang@hueic.edu.vn

ALEKSANDROVA Olga Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Binder and Concrete, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow. E-mail: aleks\_olvl@mail.ru

BULGAKOV Boris Igorevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Binder and Concrete, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow. E-mail: fakultetst@mail.ru

УДК 691.5

## ОБЛЕГЧЕННЫЕ ГИПСОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф.,  
Петропавловский К.С., Завадько М.Ю.**

© Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.,  
Бурьянов А.Ф., Петропавловский К.С.,  
Завадько М.Ю., 2021

***Аннотация.** В статье исследована возможность получения модифицированного гипсового композита с пониженным весом за счет применения пенокерамических гранул российского производства. Выявлено, что полученный материал отличается пониженной плотностью и повышенной долговечностью, что дает возможность его широкого применения в строительной индустрии.*

***Ключевые слова:** гипсовые композиты, пенокерамические гранулы, плотность, энергосбережение.*

В настоящее время для получения строительных композиционных вяжущих и материалов с улучшенными свойствами широко используются минеральные добавки и различные микро- и нанонаполнители, снижаю-

щие вес изделий, что значительно расширяет область применения гипсовых инновационных изделий [1–7]. Большой интерес вызывают исследовательские проекты по использованию минерального наполнителя.

Подобные наполнители применяют для микроармирования структуры строительных материалов [1–3]. При этом отмечается влияние добавок-наполнителей не только на физико-механические [5–7], но и на технические и эксплуатационные свойства изделий [1, 3, 6].

Наиболее известные способы получения модифицированных композитов – с применением цементного вяжущего или композиций на его основе. Так, для снижения средней плотности и улучшения технических параметров минеральных композиций с древесными опилками использовались микрокремнезем и наноразмерные частицы шунгита и кремнезема [8]. Древесно-минеральная композиция с цементом имела среднюю плотность  $747 \text{ кг/м}^3$ , при пределе прочности на сжатие – 2,3 МПа, но отмечалось высокое водопоглощение по массе – 86 %. При введении в состав наноразмерных частиц шунгита удалось снизить среднюю плотность до  $707 \text{ кг/м}^3$ , а водопоглощение по массе до рекордного значения – 27 %. Интересно, что и предел прочности при сжатии увеличился, но незначительно – до 2,7 МПа. При введении добавки с наноразмерными частицами кремнезема удалось также снизить среднюю плотность до  $670 \text{ кг/м}^3$ , а прочность при сжатии повысить до 3,5 МПа, однако водопоглощение по массе при этом увеличилось до 65 %. При использовании добавки с наноразмерными частицами кремнезема и микрокремнеземом удалось снизить среднюю плотность до  $610 \text{ кг/м}^3$ , при этом водопоглощение по массе стало 62 %, а прочность при сжатии увеличилась до 6,2 МПа.

При комплексном использовании добавок с наноразмерными минеральными микрочастицами была получена древесно-цементная композиция со средней плотностью  $610 \text{ кг/м}^3$ , водопоглощением по массе 62 % и прочностью при сжатии 6,2 МПа [8].

В некоторых исследованиях цементных композиций установлено, что очень хорошую пуццолановую реакционную способность без расширения при твердении цементного камня проявляет стеклянный порошок, полученный измельчением стекла до размеров зерен до 300 мкм [9, 10]. Кроме того, чтобы уменьшить вероятность нарушения из-за реакционной способности щелочного кремнезема, авторы [11] в своих исследованиях предложили введение дополнительного цементирующего материала: золы, кремнеземистого порошка и т. д.

Пуццоланическое воздействие золы-уноса на свойства минеральных композитов со стеклянными микрочастицами описано и в других работах [12]. Зола-уноса, оставшаяся от сжигания отходов масличных пальм, являлась в составе композиции источником кремнезема. Глиноземистые компоненты в присутствии воды образовывали силикатные и алюминатные гид-

раты при взаимодействии с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [13]. Кроме того, ограничение размера зерен молотого стекла и золы от сжигания отходов масличных пальм помогло реакционной способности достичь более высокой прочности.

Исследований в области модификации гипсовых вяжущих добавками-микронаполнителями не так много, как в области цементных вяжущих. Разработаны составы самотвердеющих гипсовых композитов с повышенными характеристиками по водостойкости, включающие в себя микродисперсные микронаполнители (аморфный кремнезем, кварц), а также побочные продукты промышленности. Однако изученные добавки в основном повышают плотность гипсового камня. Исследований в области облегченных гипсовых материалов с микродисперсными добавками [15], способствующими повышению прочности [16–19] и при этом снижению средней плотности, недостаточно.

Так, введение в облегченную гипсовую систему полых стеклянных микросфер, комплексной добавки и метакаолина позволило увеличить размеры кристаллов гипса в структуре камня, изменить их кристаллическую решетку. Это обеспечило повышение прочности при сжатии и сцепления с основанием более чем в 3 раза, высокую удельную прочность (при расходе 10 % микросфер удельная прочность при средней плотности  $805 \text{ кг/м}^3$  выше, чем у чистого гипсового камня с плотностью  $1,456 \text{ кг/м}^3$ ), коэффициент размягчения, низкую сорбционную влажность и значительное снижение водопоглощения [19]. Изменения в составах гипсовой матрицы и стенок микросфер в камнях с микросферами и пластификаторами приводят, по мнению авторов, к изменениям в кристаллической решетке гипса. Отличия межплоскостных расстояний и интенсивностей основных пиков дигидрата сульфата кальция были установлены рентгенофазовыми исследованиями камней без добавок и с добавками: микросфер, пластификаторов [19].

В данной работе исследована возможность получения модифицированного гипсового композита с улучшенными физическими и механическими параметрами, в частности с пониженным весом. Это позволит более эффективно применять гипсовые композиты в целях решения проблемы энергосбережения в области строительных технологий.

### ***Методы и материалы***

В качестве основного компонента применялись гипсовые вяжущие Самарского гипсового завода. В виде добавок использовались пенокерамические гранулы производства России.

С целью исследования технических показателей гипсового композита были использованы образцы-балочки размером  $40 \times 40 \times 160$  мм, которые после твердения в нормальных условиях были испытаны в возрасте трех суток в соответствии с требованиями ГОСТ 23789.

Варьирование добавок определялось программой исследований.

Для оптимизации состава гипсовых композитов и исследования влияния пенокерамики на прочность ( $R_c$ ) и плотность ( $\rho_0$ ) искусственного гипсового камня проводился двухфакторный эксперимент, где в качестве варьируемых параметров были приняты процентное содержание гранул ( $X_1$ ) и водосодержание смеси ( $X_2$ ). Пределы изменения исследуемых факторов и значения параметров приведены в табл. 1–3. Выбор интервалов изменения факторов приведен в табл. 3. Он обусловлен результатами предыдущих исследований. В данном исследовании водотвердое отношение меняли от 0,34 до 0,38 %.

Таблица 1

Пределы варьирования факторов (третьи сутки твердения)

$X_1$	$X_2$	$X_1$	$X_2$
–	–	0	0,34
+	–	10	0,34
–	+	0	0,38
+	+	10	0,38
–	0	0	0,36
+	0	10	0,36
0	–	5	0,34
0	+	5	0,38
0	0	5	0,36

Таблица 2

Пределы варьирования факторов (третьи сутки твердения)

$X_1$	$X_2$	$R_c$
–	–	42,96
+	–	46,10
–	+	46,71
+	+	40,27
–	0	48,17
+	0	47,72
0	–	41,05
0	+	45,62
0	0	45,39

Таблица 3

Пределы варьирования факторов (третьи сутки твердения)

$X_1$	$X_2$	$\rho_0$
–	–	1 630
+	–	1 605
–	+	1 652,5
+	+	1 506
–	0	1 540
+	0	1 608,6

Окончание табл. 3

$X_1$	$X_2$	$\rho_0$
0	–	1 652
0	+	1 526
0	0	1575

Содержание армирующих добавок в составе композита варьировалось в интервале от 0 до 10 % массы гипсового вяжущего. Результаты исследований зависимости прочности и плотности модифицированного гипсового материала от содержания добавки приведены на рис. 1, 2.

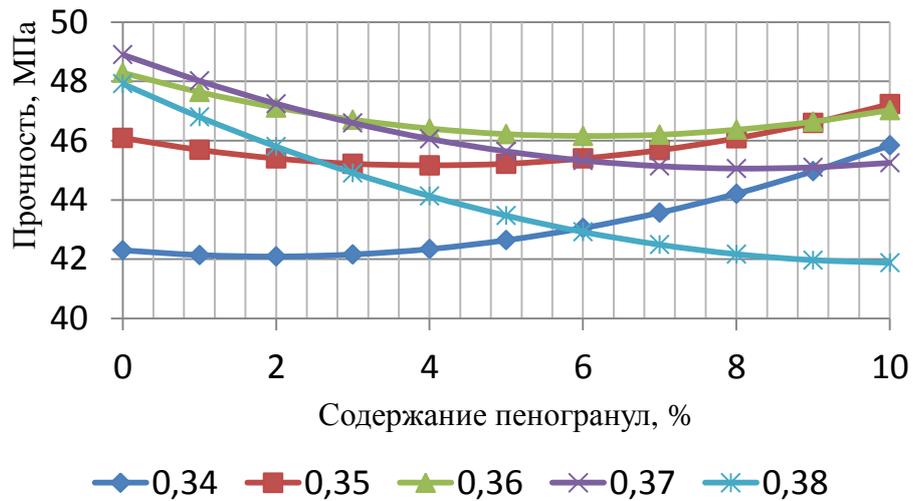


Рис. 1. Влияние армирующих добавок на прочность образцов гипса в возрасте трех суток

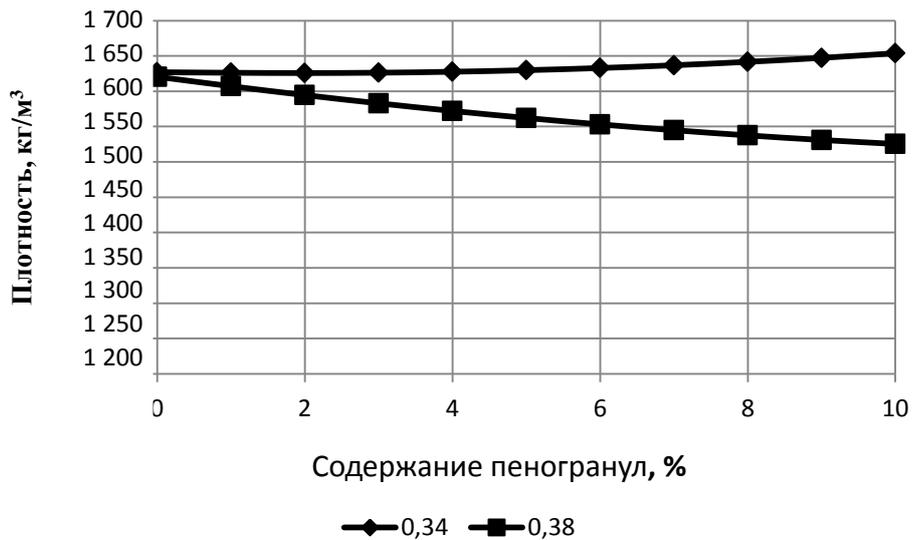


Рис. 2. Влияние армирующих добавок на плотность образцов гипса в возрасте трех суток

В результате проведенного эксперимента получено уравнение, описывающее совместное влияние входных параметров на предел прочности при сжатии полученных систем твердения:

$$Y_1(R_c) = f(X_1, X_2) = 46,225 - 0,6262X_1 + 0,4158X_2 + 1,4363X_1^2 - 2,395X_2^2 - 3,17X_1X_2, \text{ МПа,}$$

где  $Y_1$  – предел прочности при сжатии для гипсовых систем на третьи сутки твердения.

На основании расчетов построены зависимости прочности гипсового камня от процентного содержания гранул и водосодержания сырьевой смеси (см. рис. 1).

В результате проведенного эксперимента получено также уравнение, описывающее совместное влияние входных параметров на среднюю плотность полученных систем твердения:

$$Y_2(\rho_0) = f(X_1, X_2) = 1\,570,527 - 17,18X_1 - 33,81X_2 + 10,78X_1^2 - 30,375X_2^2 + 25,482X_1X_2,$$

где  $Y_2$  – средняя плотность гипсовых систем на третьи сутки твердения, кг/м<sup>3</sup>.

На основании расчетов построены зависимости средней плотности гипсового камня от процентного содержания пеногранул и водосодержания сырьевой смеси (см. рис. 2). Микроструктура пенокерамических гранул и модифицированного гипсового камня показана на рис. 3.

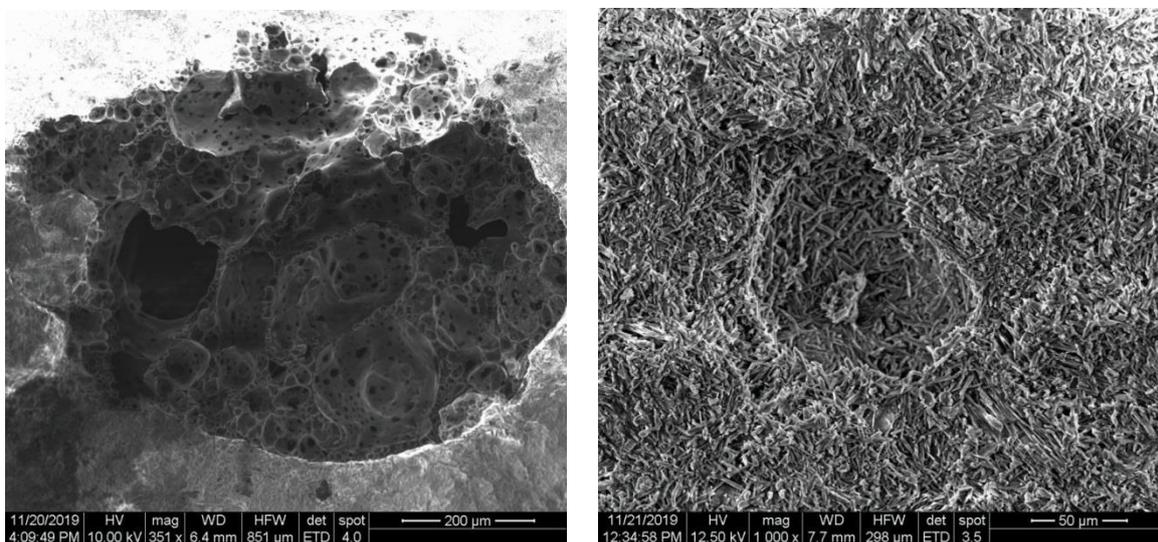


Рис. 3. Микроструктура пенокерамических гранул и модифицированного гипсового камня с добавлением пенокерамических гранул

Прочность образцов, испытанных в возрасте трех суток при значениях водосодержания 0,34–0,35, повышается. Затем характер зависимости меняется. При водосодержании 0,37–0,38 предел прочности снижается с увеличением процентного содержания воды (см. рис. 1). Максимальная

прочность в исследованном интервале соответствует 0 % содержания гранул и водосодержанию 0,37, минимальная – 0,38 при содержании гранул в количестве 10 %.

Несколько иной характер носит зависимость плотности от содержания пеногранул. Показано, что при водосодержании 0,34 плотность мало зависит от содержания гранул. Однако при увеличении водосодержания до 0,38 средняя плотность начинает уменьшаться. Минимальная плотность модифицированного гипсового камня составляет 1 525,41 кг/м<sup>3</sup>.

Анализ результатов исследования показывает, что микродисперсное модифицирование приводит к снижению плотности и прочности материала с увеличением водосодержания до 0,38.

Снижение прочности гипсового камня объясняется уменьшением количества контактов в исходной системе, а следовательно, и количества мест срастания кристаллов, что согласуется с данными [4].

При введении добавки в количестве 10 % предел прочности при сжатии гипсового композита снижается от 48 до 41 МПа. Разный характер зависимостей прочности объясняется, по-видимому, излишним количеством воды в составе сырьевой смеси.

Наименьшее значение плотности модифицированного гипсового камня достигается при содержании добавки в количестве 10 % от массы гипсового вяжущего и составляет 1 525,41 кг/м<sup>3</sup> (см. рис. 2), предел прочности камня при этом снижается на 14 %. Зависимость средней плотности от количества модифицирующей добавки носит аналогичный характер, что и прочности при сжатии для водосодержания 0,38. Пеногранулы имеют хорошо развитую систему внутренних пор. Структура модифицированного камня, полученного гидратацией гипсового вяжущего с добавлением керамического наполнителя, характеризуется хорошо сформированными кристаллами гипса, расположенными в разных плоскостях. Эти структурные особенности гранул и уплотненного модифицированного гипсового камня отражаются на свойствах материала, прежде всего, на прочности и плотности композита.

### ***Заключение***

Проведенные исследования подтверждают положительное влияние добавки на плотность гипсового материала. Модификация гипсового камня посредством введения минеральной добавки позволит снизить плотность и увеличить долговечность отделочных гипсовых материалов и изделий, а значит, повысить востребованность материалов путем обеспечения их высокого качества.

### **Библиографический список**

1. Хежев Х.А. Гипсобетонные композиты, армированные базальтовыми волокнами // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2. С. 152– 156.

2. Кузьмина В.П. Способ введения базальтового волокна в композитные материалы // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2011. № 2. С. 59.
3. Оснос М.С., Оснос С.П. Базальтовые непрерывные волокна: основные преимущества, характеристики, области применения // Композитный мир. 2009. № 5 (26). С. 36–39.
4. Особенности фазообразования в композиционном наноструктурированном гипсовом вяжущем / В.В. Строкова [и др.] // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 9.
5. Формирование структуры наномодифицированного гипсополимерного материала / М.С. Гаркави [и др.] // Сухие строительные смеси. 2013. № 2. С. 38–40.
6. К вопросу упрочнения гипсовых изделий / В.Б. Петропавловская [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2015. № 1 (192). С. 15–17.
7. Структурирование ангидритовой матрицы нанодисперсными модифицирующими добавками / И.С. Маева [и др.] // Строительные материалы. 2009. № 6. С. 4–5.
8. Древесно-цементные композиции с улучшенными физико-техническими показателями / Д.В. Орешкин [и др.] // Вестник ВолгГАСУ. 2015. № 40 (59). С. 174–185.
9. Shi C., Wu Y., Shao Y., Riefler C. Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder // Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete. Beijing, 2004. P. 789–795.
10. Schwarz N., Cam H., Neithalath N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash // Cement and Concrete Composites. 2008. № 30 (6). P. 486–496.
11. Byars E.A., Morales-Hernandez B., HuiYing Z. Waste glass as concrete aggregate and pozzolan: laboratory and industrial projects // Concrete. 2004. No. 38 (1). P. 41–44.
12. Shayan Ahmad, Xu Aimin. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs // Cement and Concrete Research. 2006. No. 36 (3). P. 457–468.
13. Raut A.N., Gomez C.P. Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder // Construction and Building Materials. 2016. No. 126. P. 476–483.
14. Патент на изобретение РФ № 2413689. Способ производства водостойких гипсовых строительных материалов. 10.03.2011. Заявка № 2008152934 от 31.12.2008 / Ю.Г. Мещеряков, С.В. Федоров.
15. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Petropavlovskii K., Buryanov A., Novichenkova T., Pustovgar A. Role of basalt dust in the formation of the modified gypsum structure // E3S Web of Conferences. 2019. URL: <https://www.e3s->

conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf\_form2018\_02036.pdf (дата обращения: 19.01.2021).

16. Petropavlovskaya V., Buryanov A., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Gypsum composites reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/325715048\\_Gypsum\\_composites\\_reinforcement](https://www.researchgate.net/publication/325715048_Gypsum_composites_reinforcement) (дата обращения: 19.01.2021).

17. Самоармированные гипсовые композиты / Петропавловская В.Б. [и др.] // Строительные материалы. 2014. № 7. С. 19–21.

18. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Buryanov A.F., Petropavlovskii K.S. Self-hardening of a gypsum // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 729. P. 517.

19. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облегченный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 45–50.

## LIGHTWEIGHT GYPSUM MATERIALS

**Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Buryanov A.F.,  
Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Y.**

***Abstract.** The article is devoted to the study of the possibility of obtaining a modified gypsum composite with reduced weight due to the use of foam ceramic granules of Russian production. The obtained material is characterized by reduced density and increased durability, which makes it possible to apply it widely in the construction industry.*

***Keywords:** gypsum composites, ceramic foam granules, density, energy saving.*

Об авторах:

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – кандидат технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: [victoriapetrop@gmail.com](mailto:victoriapetrop@gmail.com)

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: [tanovi.69@mail.ru](mailto:tanovi.69@mail.ru)

БУРЬЯНОВ Александр Федорович – доктор технических наук, консультант кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: [rga-service@mail.ru](mailto:rga-service@mail.ru)

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: ekrioro@gmail.com

ЗАВАДЬКО Мария Юрьевна – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: 79043517876@yandex.ru

About the authors:

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tanovi.69@mail.ru

BURYANOV Alexander Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Consultant of the Department of Binder and Concrete Technology, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: rga-service@mail.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Senior Researcher, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ekrioro@gmail.com

ZAVADKO Maria Yurievna – Postgraduate Student of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: 79043517876@yandex.ru

УДК 691.328.34:004.925.83

## **К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ И ПРИМЕНЕНИИ РЕАКЦИОННО-ПОРОШКОВОГО БЕТОНА**

**Самченко С.В., Османов А.Б., Абрамов М.А.**

© Самченко С.В., Османов А.Б.,  
Абрамов М.А., 2021

*Аннотация.* В статье рассмотрены достижения в области бетоноведения и технологии бетона к началу XXI в. Отмечена актуальность вопроса, связанного с применением современных бетонов, обладающих уникальными прочностными и эксплуатационными свойствами. Рассмотрены области применения бетонов нового поколения, обладающие

высокими прочностными свойствами. Проанализированы методы получения материалов, а также опыт различных ученых в сфере измельчения исходных компонентов для реакционно-порошкового бетона.

**Ключевые слова:** реакционно-порошковый бетон, бетон нового поколения, измельчение, активация.

В XXI в. архитектурные бетонные конструкции, представленные в виде фасадов зданий, остаются на пике популярности. Примером зданий, в которых для реализации архитектурных решений применяется бетон, являются Ardmore Residence в Сингапуре, Культурный центр Konan Ward в Японии и Pierres Vives во Франции (рис. 1) [1].

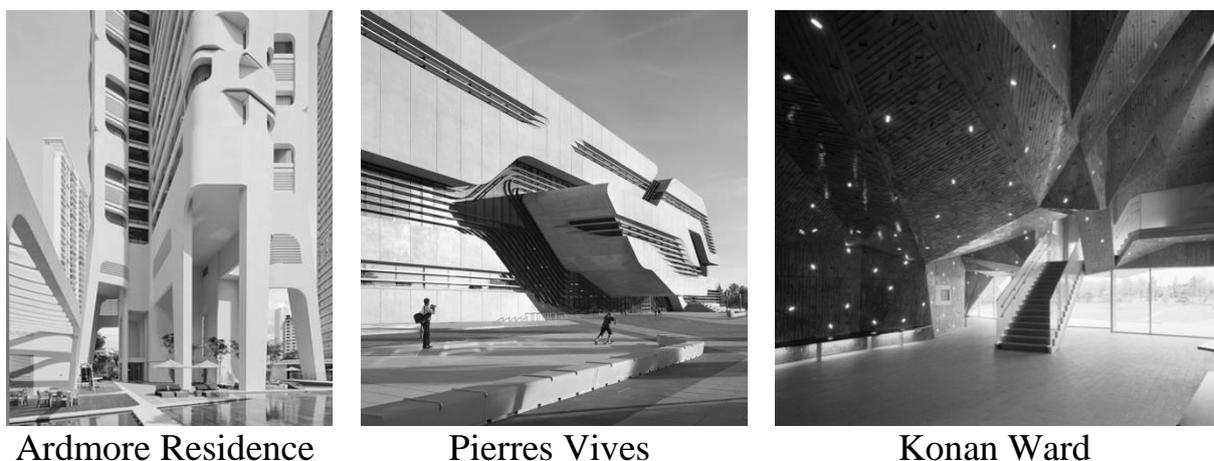


Рис. 1. Современные здания из бетона [1]

При строительстве современных архитектурно выраженных зданий применяются бетоны нового поколения, такие как высокофункциональный, самоуплотняющийся и реакционно-порошковый (РПБ) [2].

Реакционно-порошковый бетон, появившийся во Франции в конце XIX в. [3], представляет собой композиционный материал, основой которого является портландцемент, а также гиперпластификатор, микрокремнезем, молотый кварцевый песок, тонкозернистый кварцевый песок и вода.

В ходе изучения и проведения различных экспериментов с РПБ предлагаются различные составы бетонной смеси. Так, учеными из Чешской Республики в ходе выполнения работ была представлена рецептура РПБ, состоящая из цемента I 42.5R, молотого кремнезема, нанокремнезема, молотого известняка, суперпластификатора и стальной фибры. В ходе экспериментов на 28-е сутки образцы, изготовленные из РПБ, показали прочность на сжатие более 100 МПа. Однако, как отмечено авторами, разработанная рецептура РПБ все еще нуждается в корректировке [4]. Учеными из Индонезии в 2019 г. в ходе экспериментов был предложен несколько иной состав: пирогенный кремнезем, мелкий заполнитель, суперпластификатор, кварцевый порошок и цемент [5].

Приведенные работы подчеркивают актуальность вопроса, связанного с составом и подготовкой компонентов РПБ. При получении более половины компонентов, входящих в состав РПБ, подвергаются измельчению.

Так, для повышения прочностных характеристик авторами [6] предлагается увеличение удельной поверхности цемента до  $21\ 050\ \text{см}^2/\text{г}$ . Однако измельчение цемента при проектировании РПБ рассматривается не всеми учеными [14]. Данные факты отображают необходимость проверки влияния тонкости помола цемента в РПБ и его взаимодействия с остальными ультрадисперсными материалами на прочностные характеристики бетонного камня.

Методы активации цементного вяжущего для бетонных смесей с отображением достоинств и недостатков того или иного метода подробно описаны в работе [7]. Для измельчения применяются шнековые дробилки, ультразвуковые диспергаторы, коллоидальные мельницы, бисерные мельницы, газоструйные мельницы и дезинтеграторы. Один из наиболее простых методов активации портландцемента – более тонкий помол, при котором увеличивается площадь контактной зоны и количество активных центров кристаллообразования.

При этом важным параметром является способ разрушения исходного материала. Схема классификации по способу измельчения представлена на рис. 2.

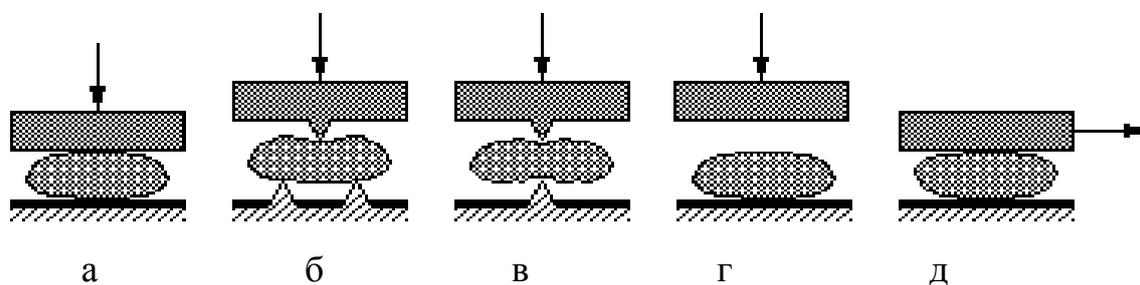


Рис. 2. Классификация по способу измельчения: а – раздавливание; б – разламывание; в – раскалывание; г – удар; д – истирание частиц материала [8]

Дезинтегратор является наиболее перспективным измельчителем ударного действия как для лабораторной практики, так и для промышленности (рис. 3). В настоящее время имеющиеся результаты различных ученых дают предпосылки для создания научной технологии дезинтеграторной обработки сырьевых материалов для бетонной смеси [8]. С использованием дезинтеграторной технологии появляется возможность выполнять измельчение и активацию не только вяжущего вещества, но и наполнителей РПБ.

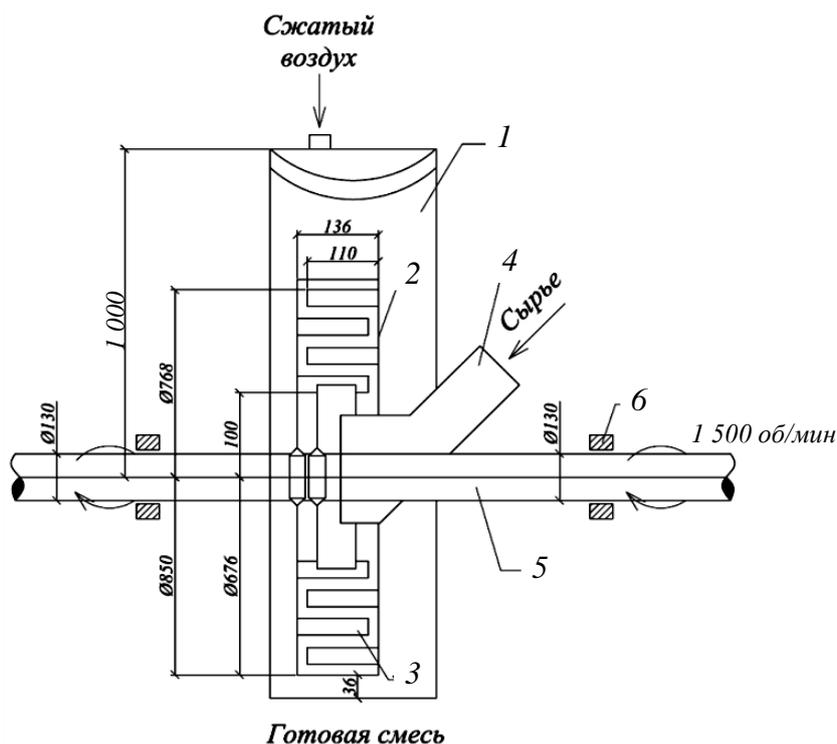


Рис. 3. Схема дезинтегратора И.А. Хинта: 1 – корпус; 2 – роторы; 3 – пальцы; 4 – загрузочный патрубок; 5 – вал; 6 – шкив [9]

Одной из ключевых проблем измельчения цемента является агломерация материала, налипание его на мелющие тела. Эти процессы усиливаются при увеличении удельной поверхности цемента. Налипание материала на мелющие тела приводит к тому, что на их поверхности образуется подушка материала, которая амортизирует удары мелющих тел по частицам цемента, что приводит к снижению эффективности измельчения в шаровой мельнице. Для уменьшения степени влияния указанных выше отрицательных явлений на помол цемента к нему добавляют интенсификаторы помола, в качестве которых необходимо использовать поверхностно-активные вещества в оптимальных количествах, установленных эмпирическим путем. Однако у них есть несколько недостатков: малая эффективность на первой стадии измельчения цемента, а также сложность дозирования и подачи в шаровую мельницу [9].

Активацию портландцемента, помимо измельчения в дезинтеграторной установке, можно произвести при помощи предварительной гидратации. В работе [10] при использовании предварительно гидратированной цементной суспензии авторы установили, что скорость набора прочности твердеющих цементных паст с добавкой 10 % предварительно гидратированной цементной суспензии растет с увеличением продолжительности предварительной гидратации добавки. Полученные результаты позволили рекомендовать добавку предварительно гидратированного цемента в виде цементной суспензии в качестве цементного геля для наномодифицирования бетона.

Авторами [11] отображено, что с увеличением продолжительности механохимической активации цементной суспензии повышается плотность мелкозернистого бетона и его прочность. При активации цементной суспензии в роторно-пульсационном аппарате (РПА) от 1 до 4 мин предел прочности при изгибе мелкозернистого бетона повышается на 65–127 % в 1-е сутки твердения, на 7–12 % в возрасте 28 суток. Оптимальное время механохимической активации с точки зрения как повышения физико-механических показателей мелкозернистого бетона, так и снижения износа рабочих органов РПА составляет 2 мин [11].

Вариант использования РПБ в конструкциях, напрямую связанных с грунтовыми водами и морской водой, например в фундаментах и гаванях, был предложен после исследований влияния сульфата на РПБ, описанных в работе [5]. В ходе экспериментов было выявлено, что при разработанном составе РПБ после воздействия сульфатов его прочность снижается на 27,2 %, а потеря веса составляет 1,5 %. На основании этих данных авторы делают вывод о возможности использования РПБ в фундаментах и конструкциях, находящихся под влиянием сульфатов.

Многогранность использования РПБ продемонстрировано также в работе [12], где авторы применяли РПБ при изготовлении сборных железобетонных балок. Балки, выполненные из РПБ согласно рецептуре, предложенной авторами, продемонстрировали уменьшение прогиба, увеличение прочности более 140 %, а также более жесткое поведение в растянутых зонах в сравнении с балками, выполненными из обычного бетона.

Таким образом, при рассмотрении реакционно-порошкового бетона, можно отметить достоинства и недостатки данного вида бетона:

Достоинства РПБ	Недостатки РПБ
Высокие прочностные характеристики на сжатие более 100 МПа	Многокомпонентность состава
Высокая прочность на ранней стадии твердения за счет увеличения скорости и степени гидратации цемента	Предварительная подготовка сырьевого материала
Высокая сульфатостойкость реакционно-порошкового бетонного камня	Стоимость РПБ при соотношении прочности бетонного камня к стоимости в сравнении с обычным бетоном выше в 15–20 раз [13]
Высокие прочностные характеристики на изгиб	

Благодаря высокой прочности и стойкости к агрессивным средам данный тип бетона можно использовать в различных конструкциях. Однако несмотря на высокий интерес ученых в активации различных сырьевых компонентов и проектировании смеси РПБ, вопрос о получении бетонной смеси с необходимыми свойствами остается нерешенным.

### **Библиографический список**

1. Jodidio Ph. 100 Contemporary Concrete Buildings. Koeln: Taschen, 2015. 730 p.
2. Калашников В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения // Строительный материалы. 2012. № 10. С. 70–71.
3. Амрута Д.А., Ваканкар Ан-Ил.Б. Механические свойства реакционно-порошкового бетона, армированного стальным волокном с использованием летучей золы // Материалы 1-й конференции Шри Чатрапати Шиваджи Махараджа QIP по инженерным инновациям. 2018. № 1. С. 339–343.
4. Hela R., Vodnarova L., Rundt L. Development of ultra high performance concrete and reactive powder concrete with nanosilica // Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 371. 8 p. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/371/1/012017/pdf> (дата обращения: 14.01.2021).
5. Kushartomo W. Durability of reactive powder concrete // Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 650. 7 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336901356\\_Durability\\_of\\_Reactive\\_Powder\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/336901356_Durability_of_Reactive_Powder_Concrete) (дата обращения: 14.01.2021).
6. Богачев Г.Г. Влияние тонкости помола цемента бетонных обделок подземных сооружений на их надежность и прочностные характеристики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 10. С. 15–19.
7. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4 (37). С. 85–99.
8. Ставров С.В., Абрамов М.А. Механохимическое получение микро-наполнителей для «умных» и многофункциональных бетонов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (поиск). Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2020. С. 635–638.
9. Молчанов В.И., Юсупов Т.С. Физические и химические свойства тонко-дисперстных минералов. М.: Недра, 1981. 162 с.
10. Щелокова Л.С., Сторонин А.А. Влияние добавки кварцевого песка на измельчение портландцементного клинкера // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 6. С. 57–66.
11. Самченко С.В., Егоров Е.С. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты // Техника и технология силикатов. 2019. Т. 26. № 2. С. 52–57.
12. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона // Magazine of Civil Engineering. 2015. No. 2. С. 63–69.
13. Ghazwan M., Kaiss F.S., Iqbal G. Flexural performance of conventional and reactive powder concrete built-up beams // Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 737. 8 p. URL: <https://www.researchgate.net/publi->

cation/346096672\_Flexural\_performance\_of\_conventional\_and\_reactive\_powder\_concrete\_built-up\_beams (дата обращения: 14.01.2021).

14. Ola Adel Qasim. Comparative study between the cost of normal concrete and reactive powder concrete // Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 518. 15 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336613-443\\_Comparative\\_study\\_between\\_the\\_Cost\\_of\\_Normal\\_Concrete\\_and\\_Reactive\\_Powder\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/336613-443_Comparative_study_between_the_Cost_of_Normal_Concrete_and_Reactive_Powder_Concrete) (дата обращения: 14.01.2021).

15. Ушеров-Маршак А.В. Методологические аспекты современной технологии бетона // Бетон и железобетон. 2002. № 1 (514). С. 5–7.

## ABOUT THE QUESTION OF THE USING AND RECEIVING OF REACTIVE POWDER CONCRETE

**Samchenko S.V., Osmanov A.B., Abramov M.A.**

***Abstract.** The relevance of the issue related to the use of modern concretes with unique strength and performance properties occupies one of the leading places. The article discusses the achievements and development of the field of concrete science and concrete technology by the beginning of the XXI century. The areas of application of new-generation concretes with high strength properties are noted. The methods of obtaining materials, as well as the experiments of various scientists in the field of grinding the initial components for reaction-powder concrete, are analyzed.*

***Keywords:** reaction-powder concrete, new generation concrete, grinding, activation.*

Об авторах:

САМЧЕНКО Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: samchenko@list.ru

ОСМАНОВ Артем Бейбалаевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: bust-05@mail.ru

АБРАМОВ Михаил Андреевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологий строительного производства, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль. E-mail: abramovma.yar@mail.ru

About the authors:

SAMCHENKO Svetlana Vasilievna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Binder and Concrete Technology, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: samchenko@list.ru

OSMANOV Artem Beybalayevich – Postgraduate Student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: bust-05@mail.ru

ABRAMOV Mikhail Andreevich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Building Production Technologies, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl. E-mail: abramovma.yar@mail.ru

УДК 699.86

## УТЕПЛЕНИЕ СТЕН С ВНУТРЕННЕЙ СТОРОНЫ ПОМЕЩЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛОМ МАРКИ ПСБ-С25

Севостьянов А.В., Ерофеев А.В.

© Севостьянов А.В., Ерофеев А.В., 2021

***Аннотация.** В статье рассмотрено утепление стен с внутренней стороны помещения пенополистиролом марки ПСБ-С25, приведены его характеристики. Показано, что при рассматриваемом методе утепления теплоизоляционный слой задерживает поступление теплоты из помещения к ограждающей конструкции, тем самым подвергая ее воздействию перепадов температур и промерзанию. Такой процесс приводит к разрушению стен, а также в значительной мере снижает тепловую инерцию ограждения.*

***Ключевые слова:** пенополистирол, ПСБ-С25, утепление с внутренней стороны.*

Одним из распространенных теплоизоляционных материалов является пенополистирол (полистирол) марки ПСБ-С25. Материал получается из гранул стирола, заполненных диоксидом углерода, которые после нагревания спекаются вместе и значительно увеличиваются в объеме (почти в 50 раз), что придает ему малый вес. Низкий коэффициент теплопроводности (0,039 Вт/м·К) достигается за счет увеличения пористости материала, что в свою очередь сказывается на чувствительности характеристик материала к изменению влажности окружающей среды, которая является одним из факторов, оказывающих влияние на эксплуатационную надежность.

Аббревиатура ПСБ-С25 означает «негорючий самозатухающий пенопласт полистирола»; число 25 – максимальную плотность этой марки. Материал долговечен, экологически чист, имеет низкое водопоглощение и не привлекает грызунов. Около 98 % воздуха в составе обеспечивает его высокую термическую и акустическую изоляцию.

Пожаробезопасность пенополистирола ПСБ-С25 обусловлена особенностями изготовления: вместо воспламеняемых веществ гранулы заполняются углекислым газом, используются антипиреновые добавки. Согласно нормативно-технической документации, изоляция имеет маркировку G1, что означает «легковоспламеняющийся». Однако существуют стандартные требования к эксплуатации пенополистирола, в том числе ПСБ-С25: ГОСТ 15588-86 предписывает, что допустимая температура изолируемой поверхности составляет не более 80 °С, плиты не должны контактировать с внутренними помещениями (они обычно защищены слоем цементно-песчаной штукатурки 30 мм).

Основные технические параметры ПСБ-С25 приведены в таблице.

Технические характеристики теплоизоляционных плит марки ПСБ-С25

Показатель	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	15–25
Прочность на сжатие (при 10 % линейной деформации), МПа	0,10
Теплопроводность, Вт/м·К	0,039
Предел прочности при изгибе, МПа	0,18
Диапазон температур для эксплуатации, °С	От –60 до +80
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,05
Влагопоглощение за 24 ч, %	2,0

Утепление наружных стен с внутренней стороны осуществляется креплением теплоизоляционного материала к внутренней стороне ограждающей конструкции с последующим устройством облицовочного слоя, который выполняется либо с использованием штукатурной смеси, либо с обшивкой из гипсокартонных листов (рисунок) [1].

При таком способе утепления теплозащитный материал, как правило, не имеющий достаточной способности к сопротивлению воздействиям внешней среды, находится в благоприятных условиях, следовательно, нет необходимости в его дополнительной дорогостоящей защите от воздействий внешних по отношению к зданию факторов. Производство работ по устройству теплозащиты с внутренней стороны может проводиться в любое время года, при этом не требуется устройство подмостей и лесов. Также одним из основных достоинств является сохранение архитектурно-художественных качеств фасадов здания.



промерзанию. Такой процесс приводит к разрушению стен, а также в значительной мере снижает тепловую инерцию ограждения.

Таким образом, данная система утепления ввиду значительных недостатков применяется крайне редко.

### **Библиографический список**

1. Леденев В.И., Матвеева И.В., Макаров А.М. Физико-технические основы повышения защитных качеств ограждений при капитальном ремонте: методические указания. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2009. 40 с.

2. Пудовкин А.Н. Выбор способа утепления наружных стен как один из способов повышения энергоэффективности зданий и сооружений // Инновационные технологии в сфере ЖКХ. Bulletin USUES. Science. Education. Economy. Series: Economy. 2014. № 1 (7). С. 169–170.

3. Собинова К.С., Ожищенко О.А., Савицкий Н.В. Анализ существующих систем теплоизоляционной отделки фасадов // Вісник ПДАБА. 2013. № 1–2 (178–179). С. 59–64.

4. Матехина О.В., Осипов Ю.К. Обобщенная теоретическая модель тепловой защиты жилых зданий с помощью наружных ограждающих конструкций // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. Серия «Архитектура и строительство». 2015. № 1 (11). С. 50–55.

## **WALL INSULATION FROM THE INSIDE OF THE SPACE WITH STYROFOAM BRAND PSB-S25**

**Sevost'yanov A.V., Erofeev A.V.**

***Abstract.** The article considers the insulation of walls from the inside of the room with expanded polystyrene of the PSB-S25 brand, its characteristics are given. It is shown that with the considered method of insulation, the thermal insulation layer delays the flow of heat from the room to the enclosing structure, thereby exposing it to temperature changes and freezing. This process leads to the destruction of the walls, and also significantly reduces the thermal inertia of the fence.*

***Keywords:** expanded polystyrene, PSB-S25, insulation from the inside.*

Об авторах:

СЕВОСТЬЯНОВ Андрей Валерьевич – студент, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: sevo-andrey@yandex.ru

ЕРОФЕЕВ Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций зданий и сооружений, ФГБОУ ВО «Там-

бовский государственный технический университет», Тамбов. E-mail: av.erofeev@yandex.ru

About the authors:

SEVOST'YANOV Andrey Valerievich – Student, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: sevo-andrey@yandex.ru

EROFEEV Alexander Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of Buildings and Structures, Tambov State Technical University, Tambov. E-mail: av.erofeev@yandex.ru

УДК 666.97

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ-УНОСА И ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ БЕТОНОВ**

**Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В.**

© Танг Ван Лам, Булгаков Б.И.,  
Александрова О.В., 2021

***Аннотация.** В статье рассмотрена возможность получения во Вьетнаме геополимерных бетонов – современных экологичных материалов, пригодных для изготовления различных строительных изделий и конструкций и позволяющих утилизировать многотоннажные промышленные и сельскохозяйственные отходы в виде топливной золы-уноса и золы рисовой шелухи, а также снизить затраты на производство.*

***Ключевые слова:** строительные материалы, геополимерный бетон, многотоннажные отходы, зола-уноса, зола рисовой шелухи.*

Высокие темпы строительства в развивающихся странах, к которым относится и Вьетнам, увеличивают потребность в строительных материалах, поэтому создание новых материалов с использованием вторичных ресурсов является актуальной задачей.

Тонкодисперсные активные минеральные компоненты, содержащиеся в техногенных отходах, позволяют снизить расход цемента вплоть до полной его замены, а также уплотнить структуру бетона и повысить его коррозионную стойкость. Применение таких сырьевых материалов позволяет улучшить эксплуатационные свойства бетона и избежать расслоения бетонной смеси [1].

Производство портландцемента, являющегося основным вяжущим для получения бетонов, оказывает серьезное негативное воздействие на окружающую среду, поскольку формирует порядка 7 % общего выброса  $\text{CO}_2$  в атмосферу [2].

В то же время существует значительное количество техногенных отходов, обладающих цементирующим действием, которые во многих странах мира просто выбрасываются на свалки. Поэтому актуален поиск рациональных путей их утилизации и оценки возможности частичной или полной замены ими портландцемента в составе бетонных смесей. Использование подобных вторичных ресурсов во Вьетнаме для получения бетонов, в частности многотоннажных золы-уноса теплоэлектростанций (ЗУ) и золы рисовой шелухи (ЗРШ), помимо расширения сырьевой базы строительной индустрии и снижения стоимости строительства, позволит решить проблему их эффективной утилизации и будет способствовать охране окружающей среды [3–6]. Одной из успешных попыток создания новых строительных материалов стало появление геополимербетонов, которые полностью исключают использование портландцемента [7].

Одними из важнейших составляющих бесцементного бетона на геополимерном вяжущем являются щелочные жидкости (сочетание  $\text{NaOH}$  и  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  или  $\text{KOH}$  и  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ), активирующие его твердение, а также наполнители и заполнители, содержащие аморфный кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) и активный оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Это могут быть природные материалы, такие как глина, а также техногенные отходы в виде ЗУ, ЗРШ и доменного шлака.

Из рис. 1 видно, что наиболее активно твердение геополимербетона протекает при тепловой обработке, во время которой происходит активация процесса растворения алюмосиликатной составляющей ЗУ, ЗРШ и доменного шлака. Более высокая температура обеспечивает большее растворение  $\text{Si}$  и  $\text{Al}$  и, следовательно, способствует образованию геополимерной цепи. При температуре 70–100 °С структурообразование происходит довольно интенсивно и прочность геополимербетонов составляет до 75–90 % на раннем этапе твердения. Увеличение содержания диоксида кремния приводит к росту соотношения  $\text{Si}/\text{Al}$ , которое ингибирует реакцию поликонденсации [8].

Минеральный состав аморфной составляющей ЗУ и ЗРШ в основном представлен минералом мелилит, состоящим из геленита  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ , акерманита  $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$  и мервинита  $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$  [7, 8].

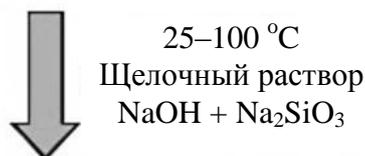
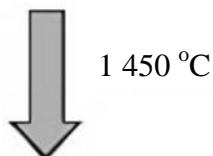
Первым этапом их реакции со щелочами является расщепление составляющих мелилита:

геленит преобразуется в (К, Na, Ca)-орто-сиалат гидрат с выделением гидроксида алюминия (рис. 2);

акерманит – в Са-ди-силоксонат гидрат (гидросиликат кальция (CSH)) с выделением гидроксида магния (рис. 3).

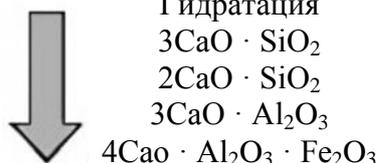
Глина – SiO<sub>2</sub> + Известняк – CaO

Зола-уноса – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Зола рисовой шелухи – SiO<sub>2</sub>



Клинкерная фаза

-Si-O-Al-O-



xCaO · ySiO<sub>2</sub> · zH<sub>2</sub>O + Ca(OH)<sub>2</sub>

Алюмосиликатная решетка

а

б

Рис. 1. Сравнительная схема традиционного (а) и геополимерного (б) бетонов

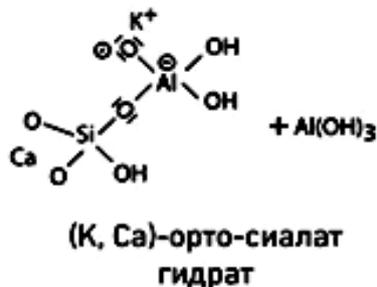
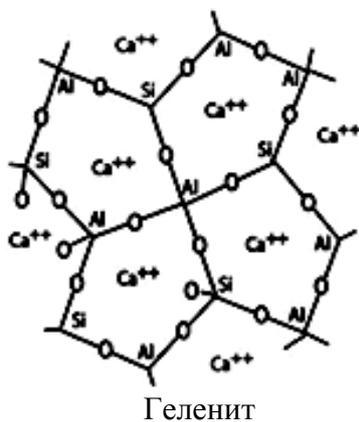


Рис. 2. Первый этап реакции ЗУ и ЗРШ со щелочами, расщепление геленита

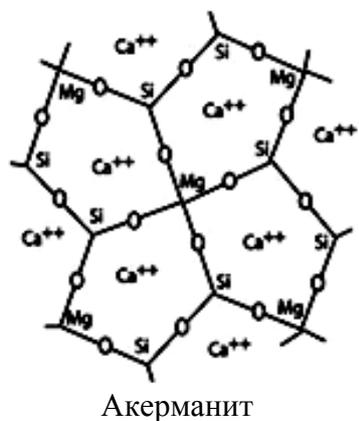


Рис. 3. Первый этап реакции ЗУ и ЗРШ со щелочами, расщепление акерманита

На втором этапе (рис. 4) реакции аморфного мелилита со щелочами одна молекула (К, Са)-орто-сиалат гидрата конденсируется с молекулой Са-ди-силоксонат гидрата (гидросиликата кальция) и формирует квадратичную орто-(сиалат-ди-силоксо) молекулу  $[\text{Si-O-Al-Si-O-Si-O}]$ , которая представлена типичной для нее единицей  $Q_2(1\text{Al})$  [7].

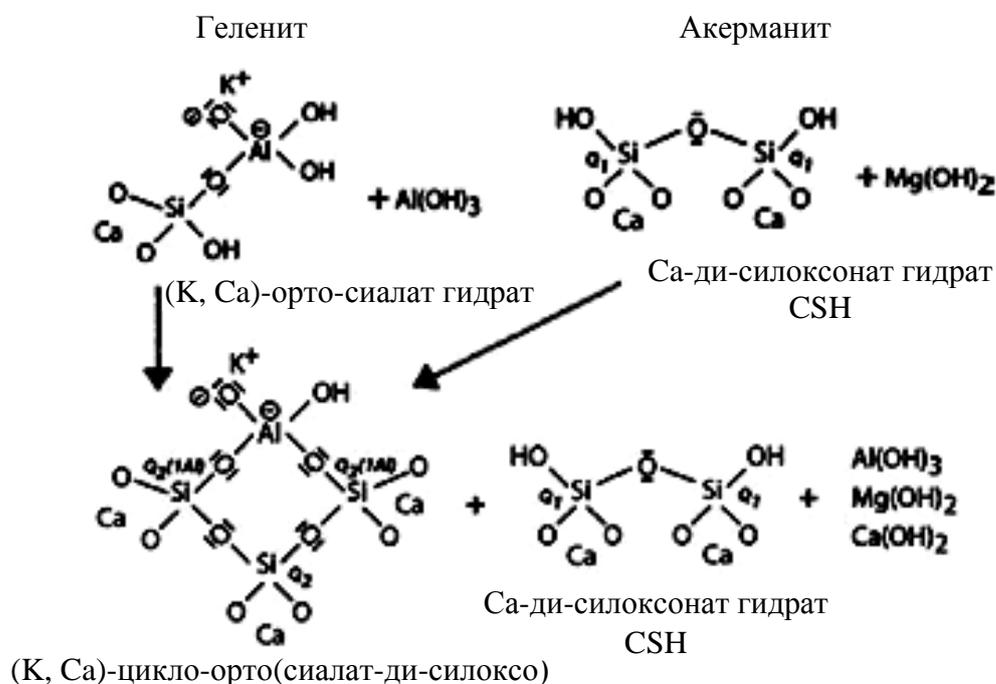


Рис. 4. Второй этап реакции ЗУ и ЗРШ со щелочами

В настоящее время бесцементный геополимерный бетон для Вьетнама представляет собой довольно новый материал, обладающий рядом существенных достоинств: высокой прочностью, коррозионной стойкостью, огне- и кислотоустойчивостью. При этом его производство состоит из двух этапов: вначале получают геополимерный цемент по приведенной выше схеме, затем добавляют инертные материалы. На основе этого принципа был подобран состав на базе геополимерного бетона для набирающей популярность технологии строительной печати домов с использованием 3D-принтеров (рис. 5).

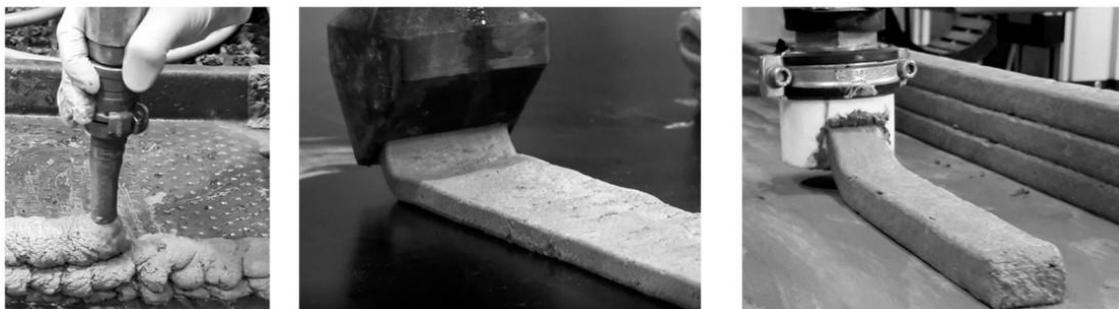


Рис. 5. Элемент стены и примеры слоев геополимерного бетона, напечатанные с помощью 3D-принтера во Вьетнаме

### **Библиографический список**

1. Возможность использования зольных остатков для производства материалов строительного назначения во Вьетнаме / Танг Ван Лам, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова, О.А. Ларсен // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 06. С. 6–12.

2. Гончарова М.А., Матченко Н.А. Разработка составов геополимерного бетона для конструкционного материала // Научные исследования: от теории к практике: материалы V Международной научно-практической конференции. 2015. № 4 (5). С. 15–18.

3. Калашникова В.А., Жерновский И.В., Кожухова Н.И. Особенности геополимерных вяжущих на основе техногенного алюмосиликатного сырья // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, 19–21 апреля 2013. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2013. С. 55–58.

4. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior / Lam Van Tang, B. Bulgakov, O. Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Yu. Bazhenov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 365. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032007> (дата обращения: 15.01.2021).

5. Rößler C., Bui D.D., Ludwig H.M. Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete // Cement and Concrete Composites. 2014. No. 53. P. 270–278.

6. Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала / Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова, О.А. Ларсен, А.Ю. Орехова, А.А. Тюрина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 08. С. 19–27.

7. Дудников А.Г., Дудникова М.С., Реджани А. Геополимерный бетон и его применение // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2018. № 1-2. С. 38–45.

8. Кожухова Н.И. Геополимерные вяжущие: природа и перспективы применения // Сборник докладов III Международного семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих строительных смесей. СПб.: Алитинформ, 2012. С. 81–86.

## POSSIBILITY OF USING RICE ASH AND RICE HULL ASH FOR GEOPOLYMER CONCRETE

Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V.

**Abstract.** *The article considers the possibility of obtaining geopolymer concretes in Vietnam – modern eco-friendly materials suitable for the manufacture of various construction products and structures, and allowing to dispose of multi-tonnage industrial and agricultural waste in the form of fly ash and rice husk ash, as well as to reduce production costs.*

**Keywords:** *construction materials, geopolymer concrete, multi-tonnage waste, fly ash, rice husk ash.*

Об авторах:

ТАНГ Ван Лам – кандидат технических наук факультета гражданского строительства, Ханойский горно-геологический университет, Ханой. E-mail: lamvantang@gmail.com

БУЛГАКОВ Борис Игоревич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: BulgakovBI@mgsu.ru

АЛЕКСАНДРОВА Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: AleksandrovaOV@mgsu.ru

About the authors:

TANG Wang Lam – Candidate of Technical Sciences of the Faculty of Civil Engineering, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi. E-mail: lamvantang@gmail.com

BULGAKOV Boris Igorevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: BulgakovBI@mgsu.ru

ALEXANDROVA Olga Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: AleksandrovaOV@mgsu.ru

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ ФОСФОГИПСОВОЙ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА ГИДРАТАЦИЮ И ТВЕРДЕНИЕ АНГИДРИТОВОГО ВЯЖУЩЕГО

Ткач Е.В., Петропавловский К.С.

© Ткач Е.В., Петропавловский К.С., 2021

***Аннотация.** В работе представлены результаты исследований по получению ангидритового вяжущего из фосфогипса, хранившегося длительное время в отвале. Определено влияние времени механоактивации фосфогипсовой сырьевой смеси на гидратацию полученного из нее ангидритового вяжущего. Установлено, что в результате механоактивации сырьевой смеси прочность ангидритового вяжущего увеличилась на 30–40 %, а коэффициент водостойкости вырос до 0,8–0,9.*

***Ключевые слова:** фосфогипс, ангидритовое вяжущее, механоактивация.*

С увеличением объемов строительства возрос спрос на сухие строительные смеси, в том числе и на гипсовой основе. В качестве сырья для производства гипсовых вяжущих используют как природные материалы (гипсовый камень, ангидрит), так и отходы различных отраслей промышленности (фосфогипс, борогипс, золу теплоэлектростанций и др.).

Фосфогипс образуется при производстве ортофосфорной кислоты и концентрированных удобрений путем сернокислой обработки природного фосфатного сырья – апатитов, фосфоритов [1].

Во всем мире бóльшая часть образующегося фосфогипса складывается в отвалах, в том числе и в России, где ежегодно количество образовавшегося фосфогипса достигает 10–12 млн т, в то время как добыча гипсового камня – 6 млн т. Это обстоятельство заставило многих ученых искать пути утилизации фосфогипса, так как его хранение вызывает загрязнение почв, водного и воздушного бассейнов в районах накопления отхода.

Основным компонентом фосфогипса является двухводный сульфат кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), что позволяет его использовать в качестве сырьевого материала при производстве гипсовых вяжущих.

Основными способами получения гипсового вяжущего из фосфогипса являются теплообработка в гипсоварочных котлах и теплообработка в автоклаве под давлением. Недостатком этих методов является наличие сточных вод, так как на качество полученного вяжущего влияют примеси

фтор- и фосфат-ионов. Чтобы снизить содержание этих примесей, проводили промывку фосфогипса [2].

Одним из способов утилизации фосфогипса и фосфополугидрата является их гранулирование и применение в качестве добавки при помолу портландцементного клинкера взамен природного гипсового камня. Чтобы обеспечить достаточную прочность гранул, в некоторых случаях предлагается проводить механоактивацию этих материалов [3].

Большинство научно-исследовательских работ и предлагаемых технологий связаны с переработкой фосфогипса в  $\alpha$ - и  $\beta$ -полугидраты сульфата кальция, что требует дополнительного этапа в производстве вяжущего – отмывки фосфогипса.

Технология получения ангидритового вяжущего из фосфогипса включает в себя обжиг сырьевой смеси, состоящей из фосфогипса, фторсодержащего компонента и извести, и последующий помол образовавшегося ангидритового клинкера. При получении ангидритового вяжущего из фосфогипса отсутствует стадия отмывки фосфогипса от примесей фтор- и фосфат-ионов.

Целью данной работы было получение ангидритового вяжущего из фосфогипса, длительное время хранившегося в отвалах, которое твердеет без активаторов твердения (ангидритовое вяжущее, полученное из природного сырья твердеет только в присутствии активаторов твердения).

Ангидритовое вяжущее, полученное из отвального фосфогипса, по сравнению с ангидритовым вяжущим из свежееобразовавшегося фосфогипса, твердеет медленно, что затрудняет его использование в производстве строительных материалов. Это связано с тем, что при длительном хранении фосфогипса кристаллы дигидрата увеличиваются в размерах, водорастворимые примеси  $P_2O_5$ ,  $F^-$  под действием внешней среды вымываются.

Для исследования использовали отвальный фосфогипс и шлам станции нейтрализации ОАО «Воскресенские минеральные удобрения». Химический состав фосфогипса и шлама приведен в таблице.

Химический состав фосфогипса и шлама  
(в пересчете на сухое вещество), масс. %

Оксиды	CaO	SO <sub>3</sub> расч.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> общ.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> водораст.	F <sup>-</sup> общ.	F <sup>-</sup> водораст.	SiO <sub>2</sub>	MgO
Фосфогипс	38,13	54,3	0,78	0,08	0,14	0,08	0,96	9,26
Шлам	20,03	0,15	1,06	–	11,66	–	–	0,5

По результатам химического и рентгенофазового анализов основным минералом фосфогипса является  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , шлама –  $CaF_2$ .

Фторид кальция позволяет получить эвтектический расплав с  $\text{CaSO}_4$  при  $900^\circ\text{C}$ , что интенсифицирует процесс обжига сырьевой смеси. Для нейтрализации кислых примесей в фосфогипсе и шламе в сырьевую смесь вводили оксид кальция. Сырьевая смесь имела состав: фосфогипса 84,2 масс. %; шлама 12,8 масс. %; оксида кальция 3 масс. %. Ангидритовое вяжущее получали обжигом сырьевой смеси при температуре  $950^\circ\text{C}$  и времени выдержки 3 ч. Полученный ангидритовый клинкер дробили и домалывали в лабораторной мельнице до удельной поверхности 400–430  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Удельную поверхность определяли методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ.

Нормальная густота ангидритового вяжущего составила 19 %, сроки схватывания: начало – 66 мин; конец – 95 мин. Прочность образцов ангидритового вяжущего при сжатии на 28-е сутки твердения составила 23,4 МПа. Коэффициент водостойкости образцов на 14-е сутки твердения после 7 суток водонасыщения составил 0,58.

Для повышения активности ангидритового вяжущего был применен метод механоактивации (м/а) фосфогипса и сырьевой смеси на его основе. Механоактивация проводилась на роторно-пульсационной лабораторной установке марки «РПУ-0,7-Л» в жидкой среде с соотношением Т:Ж = 1:5 (твердой фазы к жидкой) при частоте вращения ротора 3 000 об/мин в течение 30, 60 и 90 с.

Фосфогипс и сырьевую смесь после м/а подвергали фильтрованию и сушке при комнатной температуре. Ангидритовое вяжущее получали методом, описанным выше.

Ангидритовое вяжущее из чистого механоактивированного и немеханоактивированного фосфогипса имело нормальную густоту 24 %, при этом сроки схватывания составили: начало – 85 мин; конец – 160 мин. Образцы ангидритового вяжущего из немеханоактивированного фосфогипса после 7 суток твердения не имели прочности, но на 28-е сутки твердения показали прочность при сжатии 41 МПа. Механоактивация фосфогипса на протяжении 30 с не дала результатов, ангидритовое вяжущее имело такие же прочностные характеристики, как и в предыдущем случае. Образцы ангидритового вяжущего из фосфогипса, подверженного м/а 60 с и более, не имели прочности в 1-е сутки твердения, на 7-е сутки прочность при сжатии составила 16 МПа.

Ангидритовое вяжущее, полученное из механоактивированной сырьевой смеси, имело нормальную густоту 19–21 %. Сроки схватывания полученного вяжущего сократились (рис. 1).

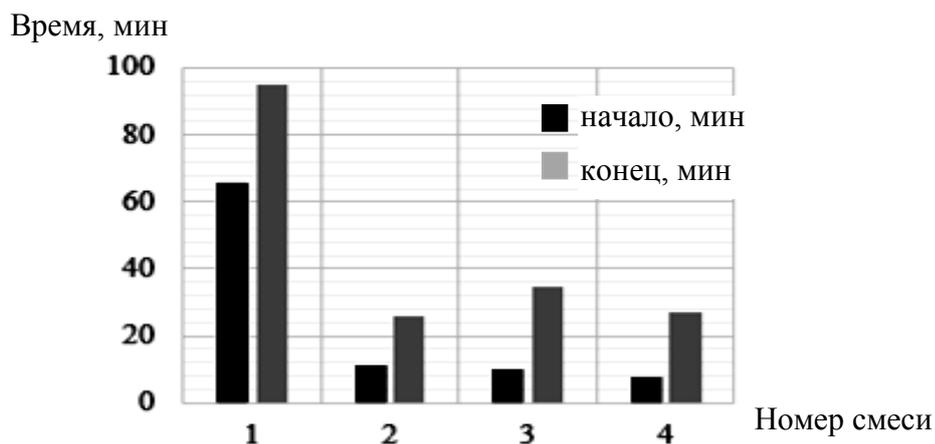
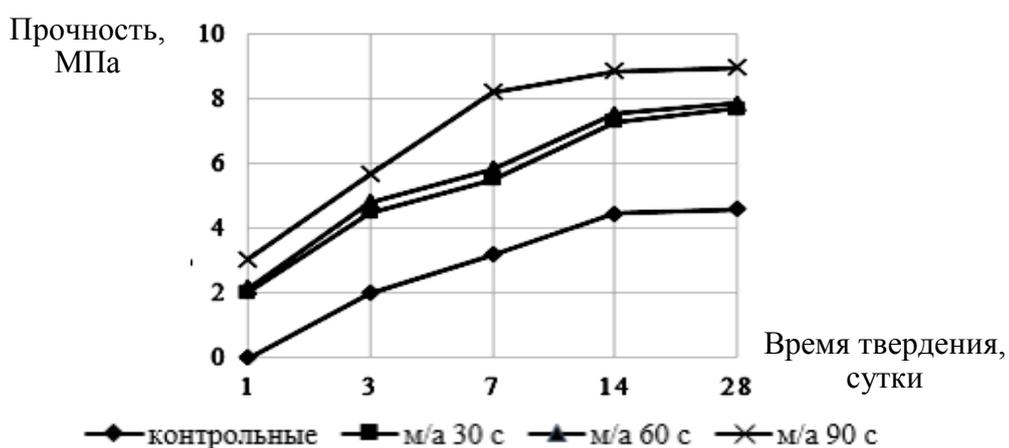
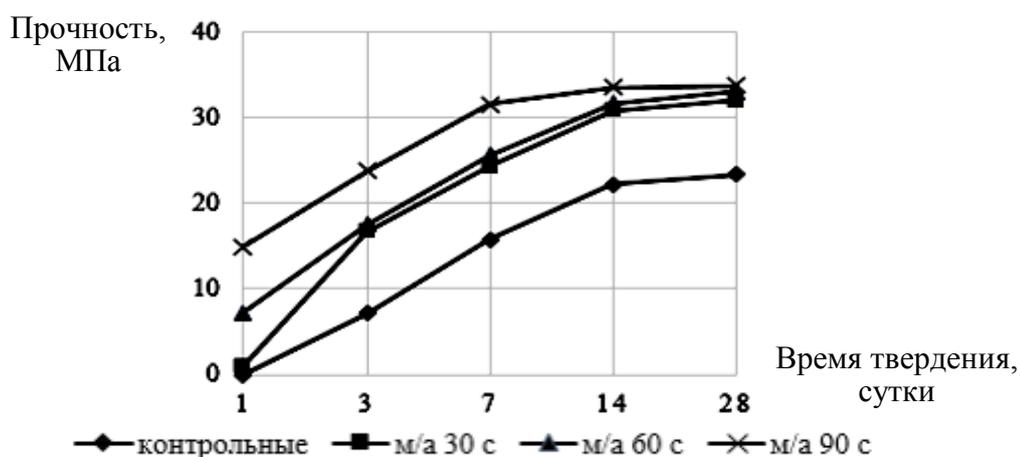


Рис. 1. Сроки схватывания ангидритового вяжущего, полученного из сырьевой смеси: 1 – без м/а; 2 – м/а 30 с; 3 – м/а 60 с; 4 – м/а 90 с

Прочностные характеристики образцов ангидритового вяжущего также увеличились (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Прочность образцов ангидритового вяжущего, полученного из механоактивированной сырьевой смеси: а – при изгибе; б – при сжатии

Образцы из механоактивированной в течение 90 с сырьевой смеси обладали большей скоростью набора прочности в ранние сроки твердения: на 1-е сутки твердения прочность образцов при сжатии составила 14,9 МПа, на 7-е сутки – 31,6 МПа. Образцы из немеханоактивированной сырьевой смеси в 1-е сутки твердения не имели прочности при сжатии, а на 7-е сутки – 15,8 МПа.

Ангидритовое вяжущее из фосфогипса является воздушным вяжущим. Исследование водостойкости ангидритового вяжущего проводилось на образцах, у которых срок воздушно-влажного твердения составил 14 суток.

Коэффициент водостойкости рассчитывался как отношение прочности при сжатии водонасыщенных образцов к прочности образцов до водонасыщения. Коэффициент водостойкости ангидритового вяжущего из природного сырья равен 0,4–0,5, из сырьевой смеси на основе фосфогипса – 0,58. С помощью м/а удалось повысить коэффициент водостойкости ангидритового вяжущего до 0,7 (рис. 3).

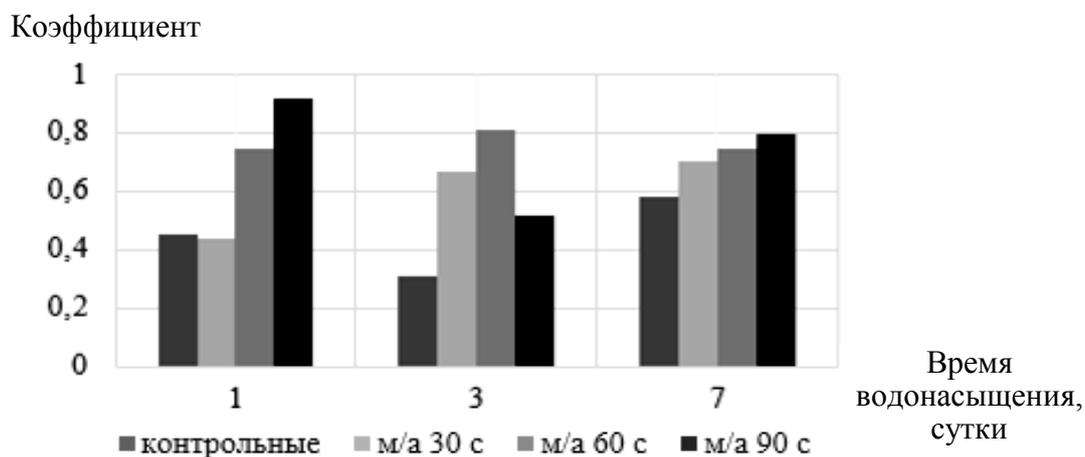


Рис. 3. Коэффициент водостойкости образцов ангидритового вяжущего из фосфогипса

Гранулометрический анализ фосфогипса до и после м/а показал, что средний размер частиц после м/а увеличился на 0,78 мкм. Очевидно, в результате м/а происходит аморфизация поверхности частиц.

Таким образом, было установлено, что фосфогипс, длительное время хранившийся в отвалах и используемый в дальнейшем как сырьевой материал для производства ангидритового вяжущего, не обеспечивает такую же высокую гидратационную активность получаемого из него вяжущего.

Ангидритовое вяжущее из механоактивированной сырьевой смеси на основе фосфогипса быстро схватывается и набирает прочность. Водостойкость такого вяжущего, по сравнению с ангидритовым из немеханоактивированной сырьевой смеси, также увеличивается в 1,5–2 раза. С увеличением времени м/а сырьевой смеси свойства ангидритового вяжущего улучшаются.

### **Библиографический список**

1. Технология фосфорных и комплексных удобрений / М.В. Андреев, А.А. Бродский, Ю.А. Забелешинский, Е.А. Зорина, А.И. Кленицкий, В.Н. Кочетков, В.И. Родин, С.Д. Эвенчик. М.: Химия, 1987. 463 с.
2. Фосфогипс и его использование / В.В. Иваницкий, П.В. Классен, А.А. Новиков, С.Н. Стонис, С.Д. Эвенчик, М.Е. Яковлева. М.: Химия, 1990. 224 с.
3. Сучков В.П. Гипсовые строительные материалы и изделия, полученные механохимической активацией техногенного сырья: автореф. дис. ... д. т. н. СПб.: СПбПУ, 2009. 42 с.

### **IMPACT OF MECHANICAL ACTIVATION OF PHOSPHOGYPSUM RAW MIX ONTO HIDRATION AND CONCRETING OF ANHYDRATE BINDER**

**Tkach E.V., Petropavlovskii K.S.**

***Abstract.** The paper presents the results of the research carried out on the production of anhydrite binder made of phosphogypsum stored for a long time in a heap. There was determined the influence of the phosphogypsum mixture mechanical activation time on the hydration of the anhydrite binder produced from such mixture. It was found out that due to mechanical activation of the raw mixture the strength of the anhydrite binder increased by 30-40 % whilst the water resistance coefficient raised till 0.8-0.9.*

***Keywords:** phosphogypsum, anhydrite binder, mechanical activation.*

Об авторах:

ТКАЧ Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: ev\_tkach@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: ekrioro@gmail.com

About the authors:

TKACH Evgeniya Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials and Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: ev\_tkach@mail.ru

PETROPAVLOVSKIY Kirill Sergeevich – Senior Researcher, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ekrioro@gmail.com

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА

Трофимов В.И., Ясюкович В.А.

© Трофимов В.И., Ясюкович В.А., 2021

***Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос повышения эффективности формования и работы под нагрузкой облегченных бетонных изделий с учетом включения пустотообразователей различной формы. Выполнен анализ влияния формы пустотообразователей на формирование соответствующего вида напряженного состояния бетонной матрицы при изготовлении многопустотной структуры бетонного стенового блока по новой технологии. Обосновывается исполнение облегченного бетонного блока с включением коротких цилиндрических вкладышей, соизмеримых по форме и объему со сферой, как наиболее технологичных в изготовлении, так и формирующих вид напряженного состояния, отличающийся повышенной прочностью.*

***Ключевые слова:** бетон, облегченные бетонные изделия, пустотность, напряженное состояние, пустотелые вкладыши.*

Одним из направлений повышения эффективности производства строительных материалов и изделий является вопрос снижения массы изделий. Особенно это важно для сооружений с большими пролетами, где применяются панели перекрытий и стеновые изделия [1].

Для снижения массы железобетонных изделий, в частности перекрытий, разработаны и используются в современной практике строительства несколько эффективных конструктивных решений и технологий для их изготовления [2].

Одним из современных эффективных методов снижения массы изделий является технология формирования облегченной структуры бетонной матрицы с включением особым образом пустотообразователей – пустотелых вкладышей. Пустотелые полимерные вкладыши могут быть различной формы: сферы, цилиндры, кубы и др. (рис. 1).

Использование пустотелых вкладышей требует учета различных факторов, в особенности технологического и эксплуатационного. С технологическим фактором связан процесс формования, при котором необходимо принимать во внимание реологическое состояние смеси. Этот вопрос был ранее рассмотрен в работе [3].

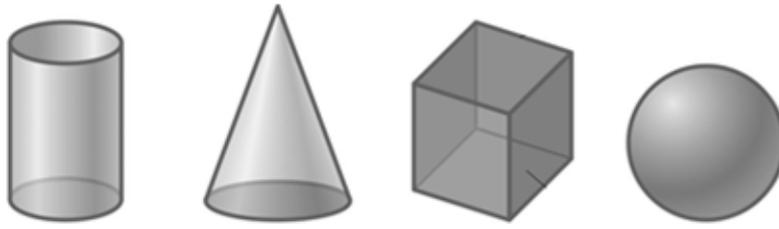


Рис. 1. Основные виды пустотообразователей-вкладышей (цилиндр, конус, куб, сфера)

Эксплуатационный фактор напрямую связан с поведением пустотелых вкладышей в бетонной матрице под нагрузкой. Была предложена технология целенаправленного равномерного распределения пустотелых вкладышей в объеме бетонной матрицы [3]. Это позволяет резко снизить влияние неоднородности на формируемое напряженное состояние изделия под нагрузкой.

Однако включение вкладышей с различными формами приводит к формированию измененного напряженного состояния бетонной матрицы при приложении нагрузки. Это связано с тем, что изменение формы пустотелых вкладышей меняет и поле напряжений вокруг них.

Известный ученый Н.А. Цытович, изучая поведение мерзлых грунтов под нагрузкой, предложил считать кристаллы льда «льдом-цементом» [4]. Такой подход позволяет при использовании метода аналогий в теории моделирования процессов применить теорию деформирования дисперсной системы на примере мерзлого торфяного грунта к описанию работы бетона [5].

Как показали исследования на модельных образцах мерзлых торфяных грунтов, выполненные на установке трехосного сжатия с независимым нагружением по трем координатным осям УИТ-1520, их прочность и деформируемость при достижении предельного состояния зависят от нескольких факторов, в том числе от вида напряженного состояния, характеризующегося параметром Лоде  $\mu_\sigma$  [5].

Для оценки напряженного состояния мерзлого торфяного грунта использовались следующие параметры и инварианты тензоров напряжений и деформаций:

- 1) среднее главное напряжение

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3),$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – три главных напряжения;

- 2) первый инвариант тензора напряжений

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3;$$

- 3) второй инвариант тензора напряжений

$$I_2 = \sqrt{1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]};$$

4) параметр Лоде, характеризующий вид напряженного состояния:

$$\mu_{\sigma} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1) + (\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3};$$

5) нормальное октаэдрическое напряжение:

$$\sigma_{\text{окт}} = I_1/3;$$

6) касательное октаэдрическое напряжение:

$$\tau_{\text{окт}} = \sqrt{2/3}I_2.$$

Параметр Лоде характеризуется тремя главными напряжениями:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ .

Результаты испытаний были представлены в рамках двух моделей деформируемости с достижением предельного состояния: модели Кулона – Мора и октаэдрической модели А.И. Боткина.

Результаты обработки трехосных испытаний с использованием предложенного критерия оценки предельного состояния, представленные согласно модели Кулона – Мора в виде зависимостей  $\tau = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ , отражающих изменение прочности системы при нагружении, не выявили реального расхождения по прочности для различных видов напряженного состояния (рис. 2). Установленная неинвариантность прочности мерзлого торфа к виду напряженного состояния  $\mu_{\sigma}$  подтверждается исследованиями для мерзлых грунтов, для которых ранее было доказано, что теория прочности Кулона – Мора, реализованная на сдвиговых приборах, не позволяет учитывать изменение пространственного напряженного состояния.

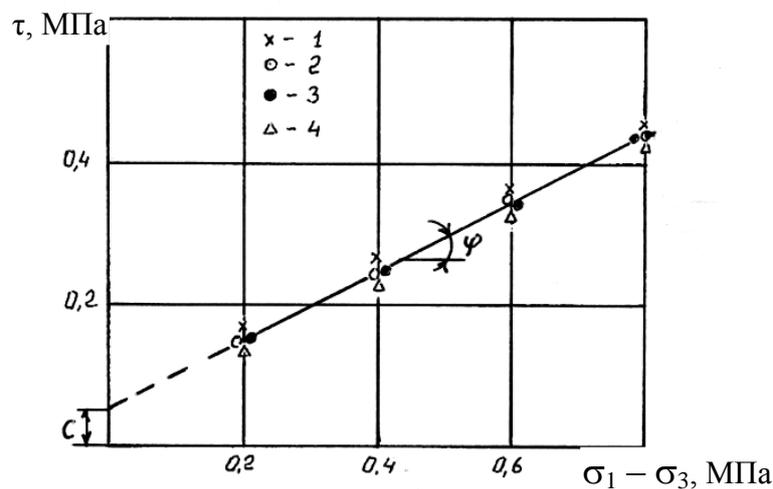


Рис. 2. Зависимость предельного напряжения сдвига мерзлого торфяного грунта от нормального напряжения (модель Кулона – Мора): 1 –  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$ ,  $\sigma_0 \neq \text{const}$ ; 2 –  $\mu_{\sigma} = -1$ ,  $\sigma_0 = \text{const}$ ; 3 –  $\mu_{\sigma} = 0$ ,  $\sigma_0 = \text{const}$ ; 4 –  $\mu_{\sigma} = +1$ ,  $\sigma_0 = \text{const}$

Полученная зависимость  $\tau = f(\sigma_1 - \sigma_3)$  не отражает влияния  $\mu_\sigma$  и может быть аппроксимирована уравнением

$$\tau = 0,08 + 0,46\sigma,$$

где  $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2(\sigma_3)$ ; при коэффициенте корреляции  $R = 0,98$ .

С использованием октаэдрической теории прочности А.И. Боткина, учитывающей работу всех главных напряжений, были построены зависимости  $\tau_{\text{окт}} = f(\sigma_{\text{окт}})$ , полученные по результатам испытаний мерзлого торфа для различных видов напряженного состояния  $\mu_\sigma$  (рис. 3).

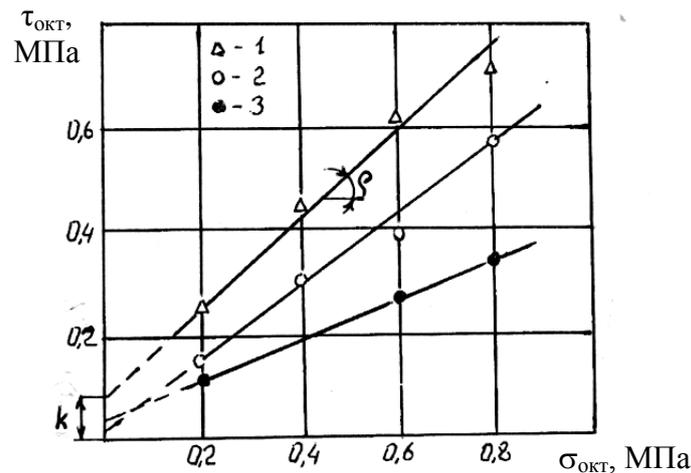


Рис. 3. Зависимость предельной прочности мерзлого торфяного грунта от вида напряженного состояния  $\mu_\sigma$  (модель Боткина):

$$1 - \mu_\sigma = -1; 2 - \mu_\sigma = 0; 3 - \mu_\sigma = +1$$

Экспериментальные исследования мерзлого торфа, выполненные на установке трехосного сжатия УИТ-1520 с независимым нагружением по всем трем координатным осям в рамках модели А.И. Боткина, были проведены при следующих траекториях деформирования:

образец подвергался всестороннему сжатию ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) до заданной величины, после чего путем увеличения  $\sigma_1$  при  $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$  достигалось предельное состояние (модель, соответствующая преимущественно сжатию);

образец подвергался всестороннему сжатию ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) до заданной величины, затем среднее напряжение  $\sigma_0$  поддерживалось постоянным и производилось разрушение мерзлого торфа путем увеличения  $\sigma_1$  при одновременном уменьшении  $\sigma_2 = \sigma_3$  (модель, соответствующая преимущественно сжатию);

образец подвергался всестороннему сжатию ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) до заданной величины, затем путем увеличения  $\sigma_1 = \sigma_2$  и уменьшения  $\sigma_3$  при  $\sigma_0 = \text{const}$  доводился до момента разрушения (модель, соответствующая преимущественно сдвигу);

производилось гидростатическое обжатие образца ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ), затем девиаторное нагружение путем увеличения  $\sigma_1$  и уменьшения  $\sigma_3$  при  $\sigma_2 = \text{const}$  и  $\sigma_0 = \text{const}$  до момента разрушения образца (модель, соответствующая преимущественно растяжению).

Параметр вида напряженного состояния  $\mu_\sigma$  (параметр Лоде) выдерживался в опытах постоянным, принимая значения  $-1$ ;  $0$  и  $+1$ .

Как видно из диаграммы зависимости  $\tau_{\text{окт}} = f(\sigma_{\text{окт}})$ , на прочность мерзлого торфа существенно влияют как величина гидростатического обжатия  $\sigma_{\text{окт}} = I_1/3 = \sigma_0$ , так и параметр вида пространственного напряженного состояния  $\mu_\sigma$ . Так, при изменении  $\sigma_{\text{окт}}$  от  $0,2$  до  $0,8$  МПа для одного вида напряженного состояния прочность повышается в  $2-3$  раза; при переходе системы из напряженного состояния, соответствующего преимущественно модели растяжения  $\mu_\sigma = +1$ , в напряженное, соответствующее преимущественно модели сжатия  $\mu_\sigma = -1$ , она также существенно повышается (почти в  $2,5$  раза).

Включение пустотелых вкладышей различной формы в матрицу бетона изменяет соответственно и вид напряженного состояния вокруг них (на  $2-3d$ ), что, во-первых, влияет на прочность самих вкладышей, а, во-вторых, нарушает однородность поля напряжений самой бетонной матрицы и в целом влияет на предельное состояние бетонного изделия.

На рис. 4 представлена схема работы пустотелых вкладышей различной формы (сфера и цилиндры различной длины) в бетонной матрице.

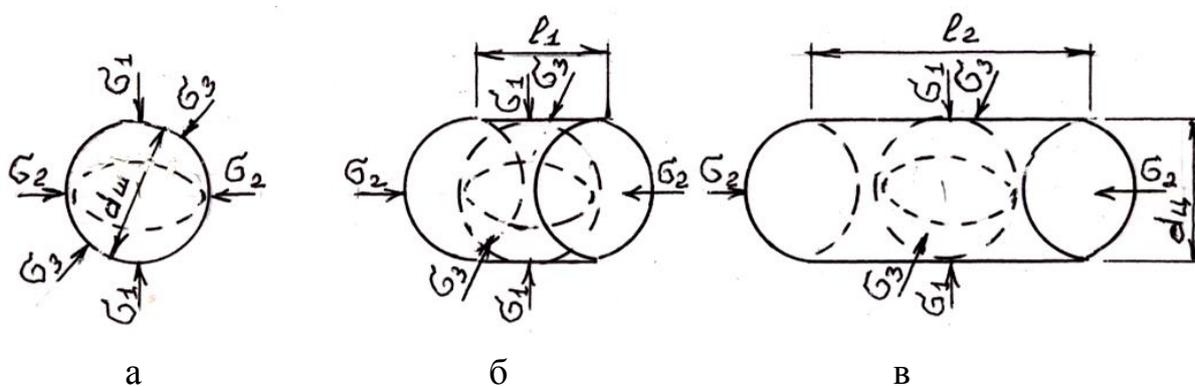


Рис. 4. Влияние формы пустотелых вкладышей на вид напряженного состояния: а – модель (сфера), соответствующая преимущественно сжатию  $\mu_\sigma = -1$ ; б – модель (цилиндр с  $l_1 = d_{\text{ш}}$ ), соответствующая преимущественно сдвигу  $\mu_\sigma = 0$ ; в – модель (цилиндр с  $l_2 \gg d_{\text{ш}}$ ), соответствующая преимущественно растяжению  $\mu_\sigma = +1$

Рассматривая форму пустотообразователей-вкладышей (см. рис. 4) можно отметить, что при допущении равенства главного напряжения  $\sigma_1$  независимо от формы остальные главные напряжения  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  будут изменяться. При этом для работы сферы вид напряженного состояния будет

соответствовать  $\mu_\sigma = -1$  ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ), для работы цилиндра с  $l_1 = d_{ц}$  вид напряженного состояния будет соответствовать  $\mu_\sigma = 0$ , но можно с небольшим допущением принять  $\sigma_2 \approx \sigma_3$ , тогда  $\mu_\sigma = -1$ , а для работы цилиндра с  $l_2 \gg d_{ц}$  вид напряженного состояния будет соответствовать  $\mu_\sigma = +1$  ( $\sigma_2 > \sigma_3$ ).

В заключение можно сказать, что выполненный анализ использования пустотелых вкладышей для образования многопустотной структуры бетонной матрицы показал, что наиболее эффективно применение вкладышей цилиндрической формы по сравнению со сферическими вкладышами. Это выгодно с точки зрения экономической эффективности, так как цилиндрические вкладыши легче изготовить по сравнению со сферическими. При этом применение цилиндрических вкладышей с длиной, равной их диаметру, позволяет обеспечить их работу в матрице с формированием напряженного состояния, близкого к работе сферы. Это обеспечивает формирование более равномерного поля напряжений вокруг пустотелых вкладышей с видом напряженного состояния, отличающегося более высокой структурной прочностью бетонной матрицы, что в конечном счете улучшает механические свойства бетонного изделия, например стенового блока, значительно снижает его массу и стоимость изготовления.

#### **Библиографический список**

1. Аралов Р.С., Римшин В.И. Анализ использования облегченных конструкций монолитных плит в российской и зарубежной практике // Проблемы науки. 2017. № 7. С. 24–29.

2. Трофимов В.И., Ясюкович В.А., Желев Н.А. К вопросу получения изделий из конструкционного легкого бетона на пустотелом заполнителе // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 16-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Т. 1. Тула: ТулГУ, 2020. С. 273–279.

3. Трофимов В.И., Ясюкович В.А. Учет физического состояния дисперсной системы при формировании многопустотной структуры бетона // Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов: сборник научных трудов по материалам Национальной научно-технической конференции с международным участием. Новосибирск: НГАУ, 2021. С. 210–214.

4. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.

5. Трофимов В.И., Кондратьев В.Г. Геотехнология и строительство на мерзлых органоминеральных грунтах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2014. 268 с.

## ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF VOIDS ON THE STRESS STATE OF CONCRETE

**Trofimov V.I., Yasyukovich V.A.**

***Abstract.** The article deals with the issue of improving the efficiency of forming and working under load of lightweight concrete products, taking into account the inclusion of void-forming agents of various shapes. The analysis of the influence of the shape of the void collectors on the formation of the corresponding type of stress state of the concrete matrix in the manufacture of a multi-void structure of a concrete wall block using a new technology is performed. The design of a lightweight concrete block with the inclusion of short cylindrical inserts, commensurate in shape and volume with the sphere, as the most technologically advanced in manufacturing, and forming a type of stress state, characterized by increased strength, is justified.*

***Keywords:** concrete, lightweight concrete products, voidness, stress state, hollow liners.*

Об авторах:

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

ЯСЮКОВИЧ Владислав Александрович – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: vlad.jasjukovich212@mail.com

About the authors:

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

YASYUKOVICH Vladislav Aleksandrovich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vlad.jasjukovich212@mail.com

## ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ГИПСОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Фишер Х.-Б., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.,  
Петропавловский К.С., Завадько М.Ю.

© Фишер Х.-Б., Петропавловская В.Б.,  
Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С.,  
Завадько М.Ю., 2021

***Аннотация.** Статья посвящена изучению возможности применения принудительной карбонизации гипсовых композитов, модифицированных отходами пылеочистки базальтовых производств, для регулирования физико-механических свойств.*

***Ключевые слова:** гипсовое вяжущее, базальтовая пыль, карбонизация, модифицирование структуры.*

Одними из наиболее востребованных сегодня показателей качества строительных материалов являются физико-механические и эксплуатационные, такие, например, как их плотность, прочность и скорость ее набора, водостойкость и ряд других. Кинетика прочности обусловлена целым рядом факторов, в числе которых находятся и условия твердения. Формирование упрочненной структуры строительных композитов путем регулирования процесса структурообразования посредством обеспечения благоприятных условий сегодня представляется перспективным направлением в строительном материаловедении ввиду отсутствия необходимости введения дополнительных дорогостоящих компонентов в состав, а лишь за счет поддержания оптимальных условий твердения.

Исследователи рассматривают возможности повышения прочности изделий посредством их выдерживания в среде, способствующей росту максимального количества кристаллических новообразований и, как следствие, формированию более жесткой матрицы композита. Например, известь при взаимодействии с углекислым газом образует прочный и водостойкий карбонат кальция в виде кристаллов кальцита. Это говорит о том, что при карбонизации (выдерживании в среде углекислого газа) композиционного материала, в состав которого входит известь, будет происходить рост карбонатных новообразований, способствующих кольматации пор материала и повышению его прочности [1–8].

Однако даже после прохождения материалом, содержащим в составе известь, ускоренной карбонизации он продолжает поглощать углекислый

газ из окружающей среды уже во время эксплуатации. Поэтому авторы работы [9] говорят также об экологичности и безопасности материалов на основе известки карбонатного твердения.

В работах [10–15] говорится о возможностях применения известковых компонентов в строительных смесях с различными составами для последующего твердения и упрочнения камня во времени за счет углекислого газа в атмосфере (например, в работе [12] в качестве такого компонента применяется известковая пыль). Такой способ повышения прочности актуален, в первую очередь, при использовании в технологиях промышленных выбросов, а не атмосферного газа. На производство 1 м<sup>2</sup> кирпичной стены (440 мм) приходится около 85 кг выбросов углекислого газа, который при изготовлении карбонизированных изделий может стать ценным компонентом [16, 17].

Целью данной работы являлось изучение возможности использования принудительной карбонизации для повышения эффективности модифицирования структуры гипсовых композитов отходами пылеочистки с базальтовых производств.

В качестве исходных материалов в исследованиях применяли гипсовое вяжущее  $\alpha$ -модификации марки ГВВС-16 (Самарская обл.), базальтовую пыль в виде отхода пылеудаления производства базальтовых волокон (Тверская обл.), молотую известь (Новгородская обл.).

Гипсовое вяжущее марки Г-16 имело характеристики:

- предел прочности при сжатии – 16 МПа;
- предел прочности при изгибе – 6 МПа;
- начало схватывания – не ранее 4,50 мин;
- конец схватывания – не позднее 20,00 мин;
- остаток на сите 0,2 мм – не более 1 %.

Негашеная молотая известь по ГОСТ 9179 соответствовала 1-му сорту и относилась к медленногасящейся. Содержание гидратной воды в негашеной известке не превышало 2 %. Качественные показатели известки сведены в таблицу.

Качественные показатели негашеной молотой известки

Требования ГОСТ 9179		Средние показатели
Активные СаО+MgO, %	Не менее 80	85,54
СО <sub>2</sub> , %	Не более 5	4,3
Пережог, %	Не более 2	0,98
Остаток на сите:	До 15	0,16
0,08 мм		3,24
Гидратная влага, %	Не более 2	1,26
Время гашения, мин, с	Не более 8	4'08"

Исследование свойств негашеной молотой извести производили по ГОСТ 22688.

Сухая смесь для изготовления образцов включала в себя гипсовое вяжущее Г-16 и базальтовую пыль от его массы. Нормальная густота гипсового теста была определена согласно ГОСТ 23789 путем испытаний на вискозиметре Суттарда и составила 36 %.

Затворение сухой смеси (контрольных образцов) осуществлялось водой или насыщенным раствором извести. Для карбонизации образцов, полученных литьевым способом, производили их выдерживание в течение 7 суток при температуре 20 °С и влажности 60 % в среде углекислого газа – CO<sub>2</sub> при давлении в камере твердения 0,015 МПа.

Исследования влияния углекислого газа (CO<sub>2</sub>) на прочность модифицированных гипсовых композитов показали, что прочность при сжатии образцов, содержащих в своем составе раствор извести, в том числе твердеющих в среде газа, в среднем на 30 % больше на 7-е сутки твердения, чем прочность контрольных образцов гипсового камня (рис. 1).

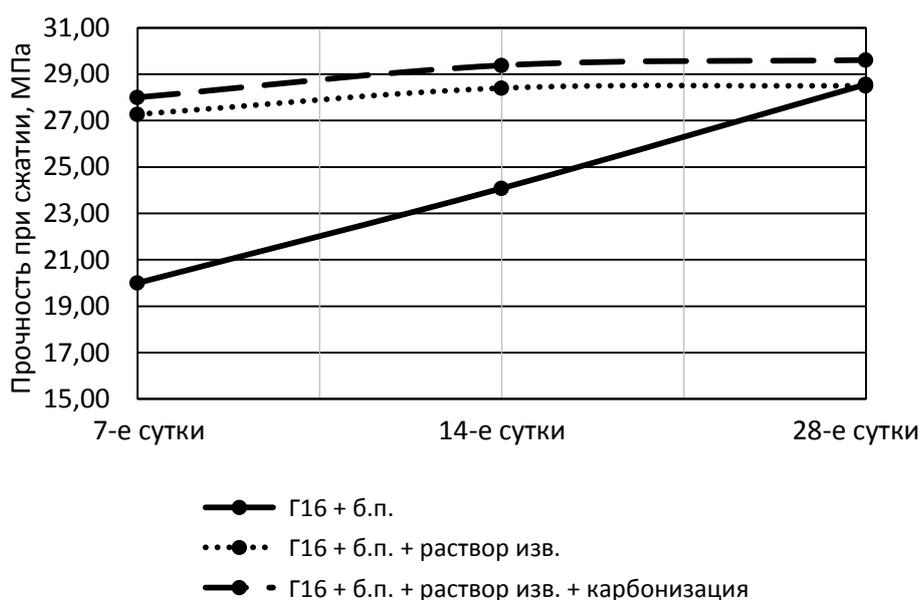


Рис. 1. Влияние условий твердения на прочность при сжатии гипсового камня

На 14-е сутки твердения прочность модифицированных образцов была больше прочности контрольных на 20 %, а на 28-й день предел прочности образцов разных составов выровнялся по значению и составил 29 МПа.

Исследованиями установлено, что влияние углекислого газа на плотность при твердении гипсового камня в сроки до 28 суток незначительно (рис. 2).

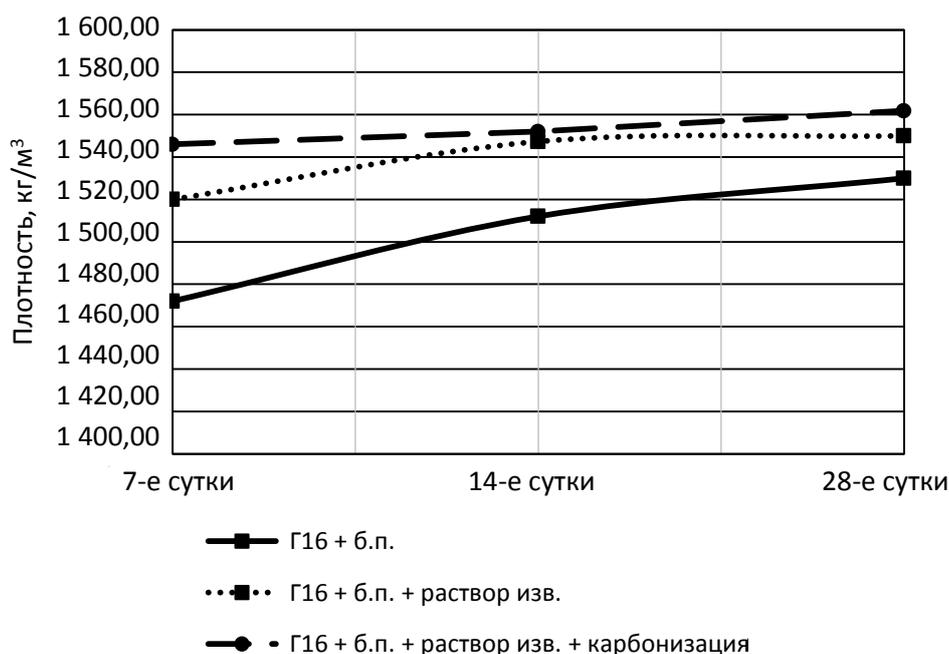


Рис. 2. Влияние условий твердения на плотность гипсового камня

Средняя плотность гипсового камня повышается в среднем не более чем на 5 % для всех исследованных составов. Это, по-видимому, объясняется формированием карбонатных соединений в приповерхностных слоях гипсового камня, а также в открытых порах, соприкасающихся со средой.

Таким образом, твердение гипсового камня, модифицированного базальтовой пылью и гидроксидом кальция, в среде  $\text{CO}_2$  при данных условиях лишь незначительно повышает его прочность в возрасте 28 суток в сравнении с контрольными образцами, что, возможно, обусловлено недостаточным количеством влаги для поддержания процесса карбонизации, а также самих пустот в структуре гипсового камня с базальтовой пылью.

Рост карбонатных новообразований во внутренней структуре камня затруднен не только по причине быстрого испарения воды, а также за счет образования плотных карбонатных пленок, формирующихся на поверхности камня.

### Библиографический список

1. Carbonization as a factor in improving the strength of reinforced concrete / A.V. Morozov, I.A. Bogomolov, D.D. Sokolov, R.I. Temirkanov, L.K. Grigoryeva // Science and business: development paths. 2017. No. 3 (69). P. 22–24.

2. Завадько М.Ю. Биопозитивные гипсовые композиты с добавкой извести карбонизационного твердения // Образование. Наука. Производство: материалы X Международного молодежного форума с международным участием. 2018. С. 1555–1559.

3. Increase in efficiency of formation structure process of the modified gypsum by carbonation / V. Petropavlovskaya, T. Novichenkova, K. Petropavlovskii, A. Buryanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/325714226\\_Increase\\_in\\_efficiency\\_of\\_formation\\_structure\\_process\\_of\\_the\\_modified\\_gypsum\\_by\\_carbonation](https://www.researchgate.net/publication/325714226_Increase_in_efficiency_of_formation_structure_process_of_the_modified_gypsum_by_carbonation) (дата обращения: 17.01.2021).

4. Завадько М.Ю., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б. Влияние условий твердения на свойства гипсоизвестковых композитов // Инновации и моделирование в строительном материаловедении: материалы IV Международной научно-технической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 46–50.

5. The use of carbon dioxide as an accelerator / S. Monkman, M. MacDonald, D. Huton, M. Thomas // Cement and Its Use. 2017. No. 1. P. 82–89.

6. Ecologically pure gypsum composites modified by microfillers / V. Petropavlovskaya, T. Novichenkova, K. Petropavlovskii, M. Zavadko // Journal of Physics: Conference Series, 2020. URL: [https://www.researchgate.net/publication/345369722\\_Ecologically\\_pure\\_gypsum\\_composites\\_modified\\_by\\_microfillers](https://www.researchgate.net/publication/345369722_Ecologically_pure_gypsum_composites_modified_by_microfillers) (дата обращения: 17.01.2021).

7. Influence of forced carbonization on the formation of aerated concrete structure based on lime-cement binder and calcium carbonate filler / N.V. Lyubomirsky, E.Yu. Nikolaenko, V.V. Nikolaenko, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtin // Building materials. 2017. No. 5. P. 48–51.

8. Strength and deformability of building materials of forced carbonate hardening / N.V. Lyubomirsky, S.I. Fedorkin, Yu.A. Kostandov, A.S. Bakhtin, S.N. Kovalenko // Construction and Industrial Safety. 2018. No. 11 (63). P. 57–65.

9. Shrinkage deformations of building materials and ways to reduce them / V.K. Kozlova, E.V. Bozhok, V.V. Logvinenko, Yu.S. Sarkisov, Yu.A. Plyevsky // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. Vol. 20. No. 5. P. 140–155.

10. The processes of carbonization shrinkage of building materials / V.K. Kozlova, V.A. Lotov, Yu.S. Sarkisov, V.V. Logvinenko, I.A. Rakhmanova, E.V. Bozhok // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. Vol. 21. No. 3. P. 178–194.

11. Recycling contaminated sediment into eco-friendly paving blocks by a combination of binary cement and carbon dioxide curing / Lei Wang, Tiffany L.K. Yeung, Abbe Y.T. Lau, Daniel C.W. Tsang, Chi-Sun Poon // Journal of Cleaner Production, 2017. URL: [https://www.researchgate.net/publication/318329226\\_Recycling\\_contaminated\\_sediment\\_into\\_eco-friendly\\_paving\\_blocks\\_by\\_a\\_combination\\_of\\_binary\\_cement\\_and\\_carbon\\_dioxide\\_curing](https://www.researchgate.net/publication/318329226_Recycling_contaminated_sediment_into_eco-friendly_paving_blocks_by_a_combination_of_binary_cement_and_carbon_dioxide_curing) (дата обращения: 17.01.2021).

12. Dvorkin L.I., Zhitkovsky V.V. Dry building mixes with the addition of lime-carbonate dust // Dry mixes. 2018. No. 4. P. 13–16.

13. Lyubomirsky N.V., Nikolaenko V.V., Nikolaenko E.Yu. Changes in the physicomaterial properties of carbonate hardening materials based on lime-limestone systems over time // Construction and Industrial Safety. 2019. No. 15 (67). P. 67–75.

14. Physico-mathematical and computer modeling of the process of forced carbonization of lime-based systems / N.V. Lyubomirsky, S.I. Fedorkin, A.N. Ryzhakov, A.S. Bakhtin // Builder of Donbass. 2018. No. 1 (2). P. 24–34.

15. Physico-chemical structure and properties of water-resistant and high-strength composite gypsum binders / N.A. Samigov, T.A. Atakuziev, M.O. Asamatdinov, S.R. Akhundzhanova // Universum: Technical Sciences. 2015. No. 10 (21). P. 4.

16. Lawrence R.M. Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars // Cement and Concrete Research. 2017. Vol. 37. Is. 7. P. 1059–1069.

17. Crystal morphology of precipitated calcite crystallized calcite crystals from accelerated carbonation of lime binders / O. Cizer, K. Van Balen, J. Elsen, D. Van Gemert // Forum Italiano Calce. Accessmode. URL: <http://www.iscowa.org/01/28/2018> (дата обращения: 17.01.2021).

## **EFFECTIVE APPLICATION OF FORCED CARBONATION IN THE PRODUCTION OF GYPSUM COMPOSITES**

**Fischer H.-B., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B.,  
Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Y.**

***Abstract.** The article is devoted to the study of the possibility of using forced carbonation of gypsum composites modified by waste dust treatment of basalt industries to regulate physical and mechanical properties.*

***Keywords:** gypsum binder, basalt dust, carbonation and structure modification.*

Об авторах:

ФИШЕР Ханс-Бертрам – доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов, Веймарский университет «Баухаус», Веймар, Германия. E-mail: [hans-bertram.fischer@uni-weimar.de](mailto:hans-bertram.fischer@uni-weimar.de)

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – кандидат технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: [victoriapetrop@gmail.com](mailto:victoriapetrop@gmail.com)

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: ekrioro@gmail.com

ЗАВАДЬКО Мария Юрьевна – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: 79043517876@yandex.ru

About the authors:

FISHER Hans-Bertram – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials, Weimar University Bauhaus, Weimar, Germany. E-mail: hans-bertram.fischer@uni-weimar.de

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tanovi.69@mail.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Senior Researcher, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ekrioro@gmail.com

ZAVADKO Maria Yurievna – Postgraduate Student of the Department of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, Tver. E-mail: 79043517876@yandex.ru

УДК 691.5

## **РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИПСОЦЕМЕНТНЫХ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

**Чернышева Н.В., Глаголев Е.С.,  
Моторыкин Д.А., Бочарников А.Л.**

© Чернышева Н.В., Глаголев Е.С.,  
Моторыкин Д.А., Бочарников А.Л., 2021

*Аннотация.* В малоэтажном строительстве 3D-технология является одной из новых и перспективных, для развития которой необходимо создание эффективных материалов с комплексом модифицирующих доба-

*вок, обладающих необходимыми регулируемыми свойствами. В статье представлены результаты экспериментальных исследований реологических характеристик быстротвердеющих формовочных смесей на основе композиционного гипсового вяжущего, которые изучали на ротационном вискозиметре «RHEOTEST RN 4.1».*

**Ключевые слова:** *формовочные смеси, реологические свойства, композиционные гипсовые вяжущие.*

В современных условиях массового и индивидуального строительства зданий и сооружений 3D-технология является одной из самых передовых, энергоэффективных, ускоряющих темпы строительства, позволяющих возводить конструкции самой разнообразной конфигурации повышенного качества и др. [1–6]. Для реализации возможностей 3D-технологии в различных сферах строительства одной из наиболее сложных и комплексных является проблема создания эффективных формовочных смесей с требуемыми регулируемыми свойствами (быстрыми сроками схватывания, достаточно высокими показателями прочности, однородности и прочности сцепления между различными слоями) с использованием недорогих и повсеместно доступных природно-сбалансированных сырьевых ресурсов с учетом их генезиса. В качестве вяжущего для этих целей в основном применяют различные виды портландцемента, но по причине медленного твердения их использование не всегда является рациональным.

Для стабильного технологического процесса возведения монолитных малоэтажных зданий методом послойного синтеза эффективными являются специальные формовочные смеси на основе композиционных гипсовых вяжущих (КГВ), включающих клинкерные минералы, гипсовое вяжущее, модифицирующие органоминеральные добавки, которые активно влияют на процессы гидратации, формирование структуры и свойства затвердевших смесей [7–9]. По физико-механическим свойствам формовочные смеси на КГВ подобны бетонным смесям на портландцементе, но обладают значительными преимуществами в возможности регулирования в широких пределах их сроков схватывания и скорости твердения. Низкая энергоемкость и простота их производства исключительно важны в технологии послойного синтеза (расход условного топлива на производство гипса в 3–5 раз меньше, чем у портландцемента). Критериями характеристиками формовочных смесей для 3D-технологии монолитного малоэтажного строительства являются показатели их экструдированности и способности держать форму, определяемые вязкопластическими свойствами смесей (вязкостью и показателями пределов текучести), а также продолжительность индукционного периода, предшествующего интенсивному росту коагуляционной структуры [10]. Были изучены реологические свойства формовочных смесей на КГВ без заполнителя и с мелким заполни-

телем (кварцевым песком): напряжение сдвига, вязкость, градиент скорости сдвига и время при температуре окружающего воздуха – 24 °С.

В качестве вяжущего в исследованиях применяли КГВ, состоящее (масс. %) из гипсового вяжущего на 58 %, включающего 70 % Г-5 БП и 30 % ГВВС-16; цемента – 20 %; минеральных добавок – отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов (отходов ММС) – 20 %; метакаолина – 0,5 %; мела – 1,5 %. Для регулирования технических свойств формовочных смесей применяли сухие органические модификаторы: суперпластификатор MAPF SU 84 – 0,3 % (от массы КГВ); стабилизатор MAPF Forbo-Create S010 при дозировке 0,07 % (по воде); загуститель MAPF NT 10 – 0,1 %; карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) – 2 масс. %. Физико-механические характеристики полученных смесей устанавливали при постоянном расплыве – 120 мм по Суттарду. Предел прочности при сжатии ( $R_{сж}$ ) затвердевших образцов определяли на образцах-кубах с ребром 7,07 см (табл. 1, 2).

Таблица 1

Составы и свойства затвердевшей формовочной смеси на КГВ

№ смеси	СП, %	СТ, %	ЗГ, %	КМЦ, %	В/Вяз	Сроки схватывания, мин, с		$R_{сж}$ , МПа в сроки		
						Начало	Конец	2 ч	Сутки	7 суток
1	–	–	–	–	0,53	10'30"	11'30"	3,3	5,8	9,6
2	0,3	0,07	0,1	2	0,40	9'30"	10'30"	9,0	10,8	23,6

Примечания:

1. Состав КГВ: гипсовое вяжущее 58 % (Г-5 – 40 %, Г-16 – 18 %); цемент – 20 %; тонкомолотые отходы ММС – 20 %; метакаолин – 0,5 %; мел – 1,5 %.
2. СП – суперпластификатор MAPF SU 84.
3. СТ – стабилизатор MAPF Forbo-Create S010
4. ЗГ – добавка MAPF NT 10 с выраженным тиксотропным эффектом загущения.
5. В/Вяз – водовязущее отношение.

Таблица 2

Состав и свойства мелкозернистой формовочной смеси на КГВ

Соотношение КГВ/песок	В/Вяз	Расплыв, мм	Сроки схватывания, мин, с		$R_{сж}$ , МПа в сроки			
			Начало	Конец	2 ч	Сутки	7 суток	28 суток
1/2	0,47	120	36'00"	40'00"	3,2	5,6	11,8	13,6

Примечание. Дополнительно вводили замедлитель сроков схватывания – лимонную кислоту в количестве 0,2 % (от массы КГВ).

Для оценки реологических свойств формовочных смесей на КГВ с комплексом рассмотренных выше органических добавок без заполнителя и с кварцевым песком использовали вискозиметр «RHEOTEST RN 4.1». Реологические зависимости представлены на рис. 1–3.

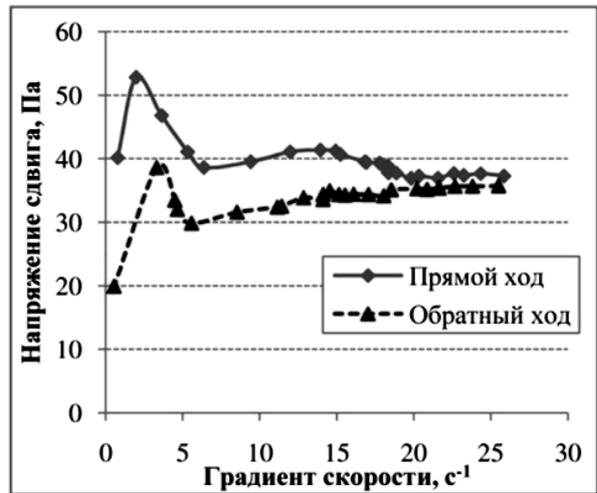
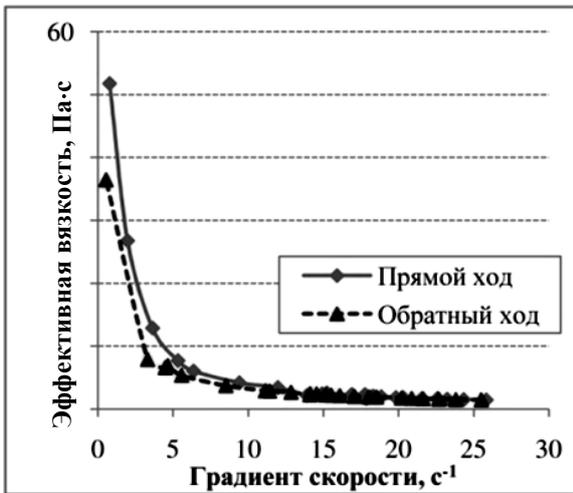


Рис. 1. Реограмма формовочной смеси на КГВ (состав 1)

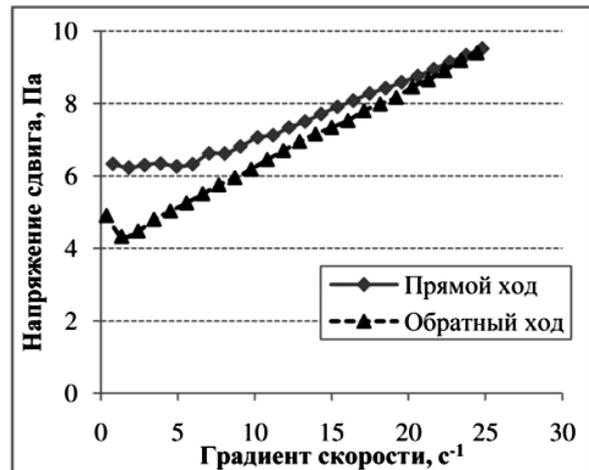
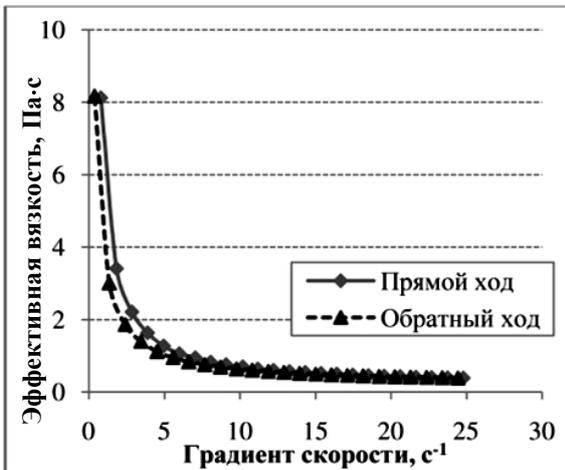


Рис. 2. Реограмма формовочной смеси на КГВ без наполнителя с комплексом органических добавок (состав 2)

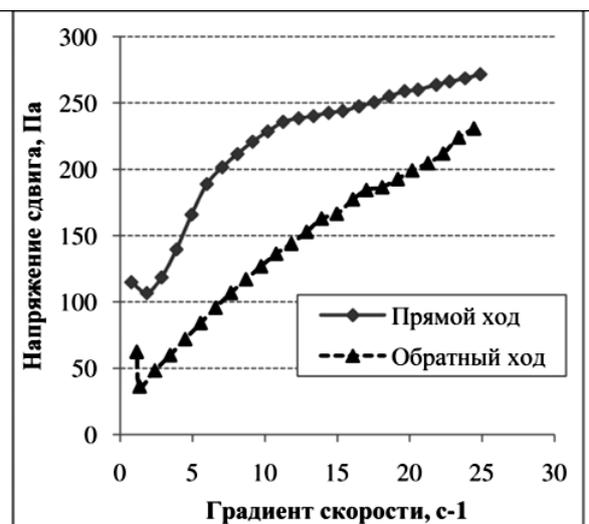
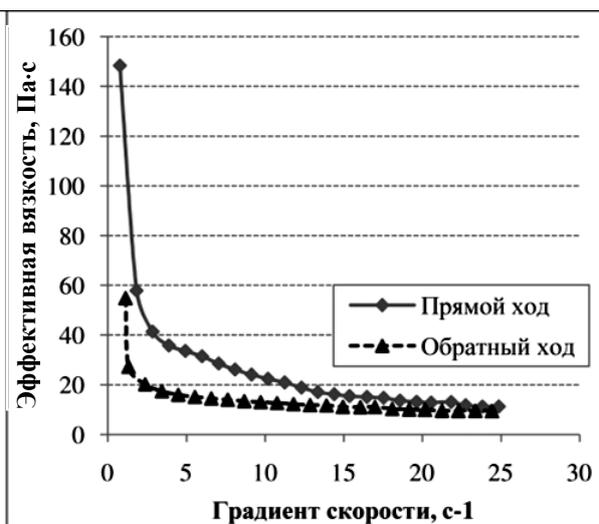


Рис. 3. Реограмма формовочной смеси на КГВ с комплексом органических добавок и кварцевым песком

В результате проведенных исследований было выявлено следующее. Реограмма контрольного состава смеси (см. рис. 1) в координатах «напряжение сдвига – градиент скорости сдвига» в данных условиях имеет резко выраженный пик в начальной области, начиная с величины сдвигового напряжения – 40,18 Па и вязкости 51,74 Па·с, свидетельствующий о повышенном предельном напряжении сдвига, при котором начинается течение. С одной стороны, это положительно влияет на фиксацию структуры напечатанного слоя конструкции, а с другой – существенно усложняет подачу смеси в формирующее устройство.

При достижении значения градиента скорости сдвига  $11,97 \text{ с}^{-1}$  наблюдается снижение значений вязкости до 3,43 Па·с (первоначальная структура разрушается) и затем следует участок вязкого течения.

Обратная ветвь исследуемой реограммы контрольной смеси практически идентична прямой ветви. Формовочная смесь на КГВ подвергается тиксотропному разжижению, а при снятии внешних воздействий восстанавливает свою структуру (см. рис. 1, график справа).

Формовочная смесь (см. рис. 2) с комплексом органоминеральных добавок имеет наименьшую вязкость, предельное напряжение сдвига (начало течения) и структурированность системы «КГВ – вода» во всем рассмотренном диапазоне градиентов скорости сдвига, что создает потенциал по снижению водовязущего отношения и, соответственно, по повышению прочности.

Наблюдается синергетический эффект как результат совместного действия применяемых органических добавок, существенно превышающий сумму действий каждой из них. Это позволило получить оптимальное соотношение свойств формовочных смесей на всех этапах цикла: питания формирующего устройства; нагнетания смеси и прохождения через наиболее узкое сечение экструдера (сопла); первичной фиксации структуры свежеотформованного слоя (формоустойчивость).

Низкий зазор между прямой и обратной ветвями реограммы (малая площадь петли гистерезиса) свидетельствует о возможности быстрого восстановления структуры, что и требуется для специальных формовочных смесей, используемых в строительных 3D-технологиях с целью быстрой фиксации выдавливаемого слоя (см. рис. 2, график справа).

Отсутствие пика на прямой ветви реограммы является положительным с точки зрения питания формирующего устройства. Подобные смеси способствуют снижению нагрузки на электродвигатель бетонного смесителя и 3D-принтера и в наилучшей степени подходят для приготовления формовочных смесей с мелким наполнителем.

При исследовании формовочной смеси на КГВ с кварцевым песком (при соотношении КГВ/песок = 1/2) и с комплексом рассмотренных выше органических добавок выявлено, что на общем фоне закономерного повышения вязкости полученная мелкозернистая формовочная смесь на КГВ

демонстрирует преимущество основных реологических особенностей характера течения смеси без заполнителя (см. рис. 3).

Формовочная смесь на основе КГВ с кварцевым песком быстро твердеет и набирает прочность, обеспечивает в ранние сроки твердения (сутки) класс бетона по прочности на сжатие В3,5, а в возрасте 7 и 28 суток – В7,5–В10 (см. табл. 2)

Выполненные исследования подтвердили возможность управления реологическими свойствами специальных формовочных смесей на КГВ за счет комбинированных функциональных и реологически активных добавок с обеспечением оптимизации их свойств под особенности различных типов формовочного оборудования и решаемых задач.

Формовочные смеси на основе КГВ для 3D-аддитивных технологий без заполнителя обеспечивают в ранние сроки (от 2 ч до 7 суток) предел прочности при сжатии 23,6 МПа, а с мелким заполнителем (кварцевым песком) – в ранние сроки твердения (через сутки) класс бетона по прочности на сжатие В3,5, а в возрасте 7 суток – В7,5.

Исследования по получению специальных формовочных смесей на КГВ были проведены в рамках реализации «Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 года».

#### **Библиографический список**

1. Славчева Г.С., Котова К.С. Повышение эффективности применения неавтоклавных ячеистых бетонов (пенобетонов) в строительстве // Жилищное строительство. 2015. № 8. С. 44–47.
2. Эффективные композиты для 3D-аддитивных технологий в строительстве / В.С. Лесовик, Е.С. Глаголев, А.Н. Володченко, М.Ю. Дребезгова // Вестник центрального территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2016. Вып. 15. С. 149–156.
3. Дребезгова М.Ю. Современные аддитивные технологии в малоэтажном строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 6. С. 66–69.
4. Пустовгар А.П., Адамцевич А.О., Волков А.А. Технология и организация аддитивного строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 12–20.
5. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 863–876.
6. Ключев С.В., Ключев А.В., Шорстова Е.С. Фибробетон для 3D-аддитивных технологий // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. № 4. С. 14–20.
7. Composite gypsum binders with silica-containing additives / N.V. Chernysheva, V.S. Lesovik, M.Yu. Drebezgova, S.V. Shatalova, A.N. Alaskhanov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018. URL: <https://www.>

iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032015 (дата обращения: 15.01.2021).

8. Дребезгова М.Ю. Реологические свойства системы «Композиционное гипсовое вяжущее – суперпластификатор – вода» // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 68–70.

9. Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция / В.В. Белов, А.Ф. Бурьянов, Г.И. Яковлев, В.Б. Петропавловская, Х.-Б. Фишер, И.С. Маева, Т.Б. Новиченкова. М.: Де Нова, 2012. 196 с.

10. Урьев Н.Б. Динамика структурированных дисперсных систем // Коллоидный журнал. 1998. № 5. С. 662–683.

## **RHEOLOGICAL PROPERTIES OF GYPSOCEMENT MOLDING MIXTURES FOR 3D-TECHNOLOGIES OF LOW-RISE CONSTRUCTION**

**Chernysheva N.V., Glagolev E.S.,  
Motorykin D.A., Bocharnikov A.L.**

***Abstract.** In low-rise construction, 3D-technology is one of the new and promising ones, for the development of which it is necessary to create effective materials with a complex of modifying additives with the necessary adjustable properties. The article presents the results of experimental studies of the rheological characteristics of fast-hardening molding sands based on composite gypsum binder, which were studied on a rotational viscometer «RHEOTEST RN 4.1».*

***Keywords:** molding mixtures, rheological properties, composite gypsum binders.*

Об авторах:

ЧЕРНЫШЕВА Наталья Васильевна – профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород. E-mail: chernysheva56@rambler.ru

ГЛАГОЛЕВ Евгений Сергеевич – доцент кафедры строительства и городского хозяйства, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород. E-mail: sk31.es@gmail.com

МОТОРЫКИН Дмитрий Александрович – аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород. E-mail: l20102@yandex.ru

БОЧАРНИКОВ Андрей Леонидович – студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород. E-mail: andrew220399@gmail.com

About the authors:

CHERNYSHEVA Natalya Vasilievna – Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod. E-mail: chernysheva56@rambler.ru

GLAGOLEV Evgeniy Sergeevich – Associate Professor of the Department of Construction and Municipal Economy, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod. E-mail: sk31.es@gmail.com

MOTORYKIN Dmitry Aleksandrovich – Postgraduate Student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod. E-mail: 120102@yandex.ru

BOCHARNIKOV Andrey Leonidovich – Student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod. E-mail: andrew220399@gmail.com

УДК 691.328.34

## **ОСОБЕННОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ПОРИЗОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЕЧАТИ**

**Чернышева Н.В., Шаталова С.В.**

© Чернышева Н.В., Шаталова С.В., 2021

***Аннотация.** В статье рассмотрена возможность отхода от традиционных рецептур композиционных гипсовых вяжущих за счет применения портландцементов с различными минеральными добавками, исследовано влияние используемого пенообразователя на процесс твердения системы «гипс – портландцемент с различными минеральными добавками».*

***Ключевые слова:** строительная печать, пенобетон, композиционное гипсовое вяжущее, портландцементы с минеральными добавками.*

Одной из самых передовых тенденций развития строительных технологий является строительная печать. Согласно большому количеству публикаций, ее преимуществом являются повышение темпов строительства, возможность создания конструкций рациональных сечений самой разнообразной конфигурации и др. [1, 2].

Существующие промышленные модели 3D-принтеров в качестве строительного материала в основном используют бетонную смесь, которая экструдируется горизонтально на ранее выложенный принтером слой. Возведенная таким образом конструкция должна соответствовать предъявляемым нормативным требованиям, важнейшими из которых являются прочностные и теплофизические. Если прочностные показатели возводимых конструкций вполне достаточны для возведения несущих стен малоэтажных зданий, то требуемые теплофизические показатели достижимы только с применением утеплителей. Однако такие решения идут в разрез с основной идеей 3D-печати – созданием готового изделия одной установкой [3–5]. Поэтому весьма перспективным является освоение печати поризованными материалами, имеющими показатели, сопоставимые с традиционно применяемыми, что, с одной стороны, позволит сделать технологию привлекательной для малого и среднего бизнеса, а с другой – откроет новые грани использования аддитивных технологий.

С этой точки зрения интерес представляют такие материалы, как керамзитобетон, пенобетон и неавтоклавный газобетон. Согласно анализу публикаций, находящихся в открытом доступе, данное направление находится в начальной стадии. Известны работы по исследованию возможности цифровой печати керамзитобетоном, пенобетонами [6] и неавтоклавными газобетонами [7].

На наш взгляд, для подобных целей в качестве альтернативы неавтоклавным газобетонам и другим указанным материалам целесообразно применять пенобетон ввиду простоты технологии, экономичности, возможности возводить несущие стены и конструктивные элементы с такими же свойствами, как на основе традиционных материалов: высокой теплоизоляцией, звукопоглощением и огнестойкостью.

Технология пенобетона сама по себе исследована в достаточной степени [8–10]. Основными проблемами для ее адаптации к строительной печати, на наш взгляд, являются необходимость в быстрой фиксации структуры и обретение конструкцией несущей способности, чтобы укладываемые слои не подвергались внешним воздействиям. Серьезной проблемой, которой уделяется мало внимания, является также способность материалов твердеть в неблагоприятных условиях стройплощадки, в частности в условиях быстрого обезвоживания.

Использование традиционных гидравлических вяжущих не является рациональным по причине их медленного твердения даже при использовании ускорителей, как и применение воздушных вяжущих, в частности

гипса, ввиду их низкой водостойкости. В связи с этим, на наш взгляд, весьма перспективным для этих целей может быть внедрение быстротвердеющих композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) повышенной водостойкости с активными минеральными добавками разного генезиса [11]. Однако минеральные добавки, обладающие высокой активностью, являются дорогостоящими, а те, которые являются отходами производств, зачастую имеют непостоянный состав и не обладают стабильными свойствами. Кроме того, многокомпонентность состава усложняет технологию производства и повышает стоимость аддитивного строительства, что невыгодно малому бизнесу. Вследствие этого весьма заманчиво получать КГВ без минеральной добавки, путем смешения только двух компонентов, что позволит повысить содержание активных компонентов и потенциально прочность пенобетона.

Известно, что активная минеральная добавка в составе КГВ необходима для связывания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , тем самым она исключает условия образования этtringита и высокоосновных гидроалюминатов кальция [11]. Поэтому была выдвинута гипотеза, что в высокопористых системах при использовании портландцементов, содержащих минеральные добавки, количество данных процессов будет минимальным.

Второй проблемой при получении пенобетона является то, в какой степени используемый пенообразователь влияет на процесс твердения вяжущего. В связи с этим основной задачей исследования являлось изучение влияния вида портландцемента и пенообразователя на прочность и стабильность КГВ.

В данной работе в качестве вяжущей основы КГВ применяли гипсовое вяжущее  $\alpha$ -модификации ГВВС-16 (Г-16) ЗАО «Самарский гипсовый комбинат»; портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Новоросцемент» (ЦЕМ I); портландцемент ЦЕМ II/A-II 42,5СС ОАО «Новоросцемент» (ЦЕМ II (СС)); портландцемент ЦЕМ II/B-III 42,5Н ООО «Южно-уральская горно-перерабатывающая компания» (ЦЕМ II (Ш)). В качестве порообразующей добавки использовали пенообразователь «Пеностром» ООО «ЩИТ», соответствующий ТУ 0250-001-22299560-97.

Для моделирования поведения изучаемой системы для каждого состава КГВ с различными видами портландцемента был осуществлен двухфакторный трехуровневый эксперимент. Условия планирования эксперимента представлены в таблице. Количество воды затворения принималось постоянным –  $V/T = 0,45$ .

### Условия планирования эксперимента

Фактор		Уровень варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	1	
Доля гипса в смеси, %	$x_1$	25	50	75	25
Дозировка пенообразователя, %	$x_2$	0	0,3	0,6	0,3

В качестве выходных параметров была принята прочность затвердевшего композита в возрасте 7, 14 и 63 суток при хранении в воздушно-влажных условиях. Выбор указанных временных интервалов связан с тем, что показатели системы в возрасте 7 суток позволяют оценить вклад гипса в формирование прочности композита. Кроме того, такой возраст, как показывает практика, является максимальным до критического обезвоживания материала в неблагоприятно сухих условиях среды. Прирост прочности композита в интервале 7–14 суток обеспечивается в основном за счет цемента, при этом развитие деструктивных явлений еще минимально. Интервал времени до 63 суток обеспечивает как максимально возможную в конкретных условиях гидратацию цемента, так и развитие основного объема деструктивных процессов. Испытания, проведенные в данном возрасте, необходимы для оценки стабильности полученной системы.

На основании уравнений регрессий были получены зависимости динамики набора прочности камня на основе КГВ с различными видами портландцементов (рис. 1). При этом количество пенообразователя (фактор  $x_2 = -1$ ) равно 0. Фактор  $x_1$  (доля гипса в смеси) варьировался во всем рассматриваемом диапазоне.

На рис. 2 представлена зависимость прочности камня на основе КГВ с пенообразователем в количестве 0,3 % от массы вяжущего (фактор  $x_2 = 0$ ). Исследование вели на плотных, а не поризованных системах во избежание влияния колебаний величины достигаемой пористости на прочностные показатели.

Сравнивая полученные составы в соотношении гипс/клинкер/минеральная добавка на основе ЦЕМ II (Ш) (50/20/30) и ЦЕМ II (СС) (50/30/20) с составами КГВ, где в качестве минеральных добавок использовались бой тяжелого бетона (ТБ) и кварцитопесчаник (КВП) в соотношении гипс/портландцемент/минеральная добавка (60/20/20), имеем сопоставимые показатели прочности затвердевшего камня в возрасте 28 суток и коэффициенты размягчения.

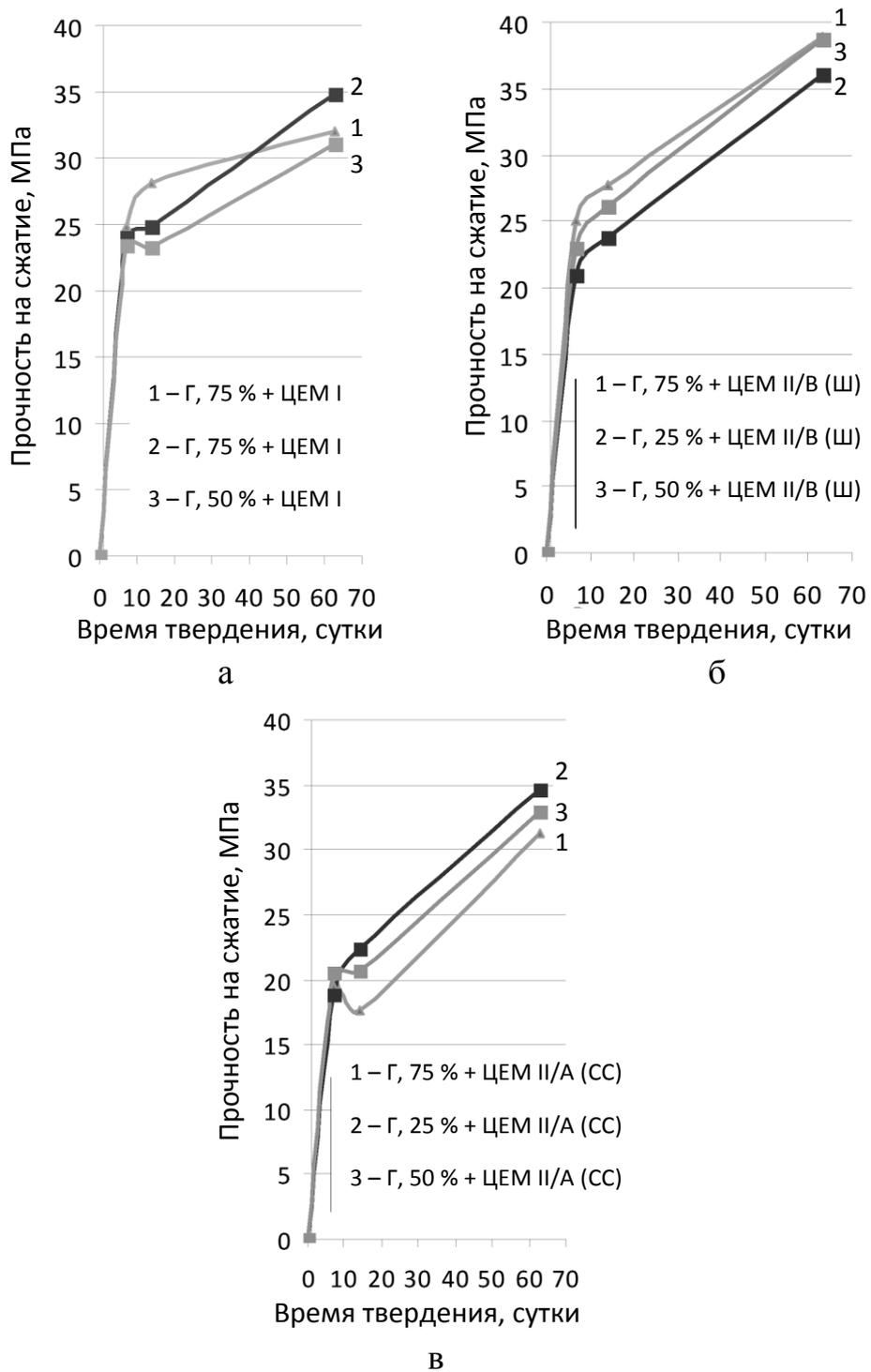
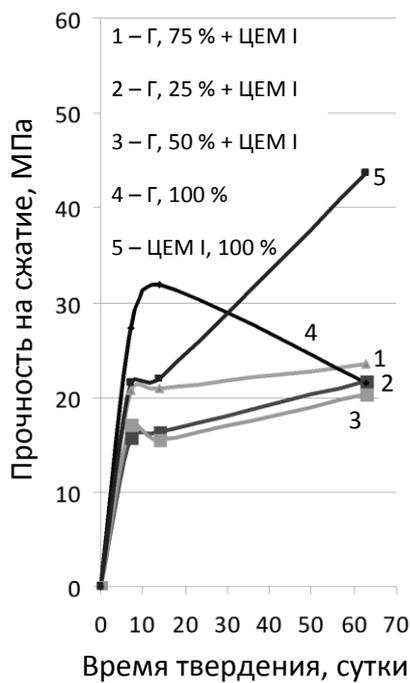
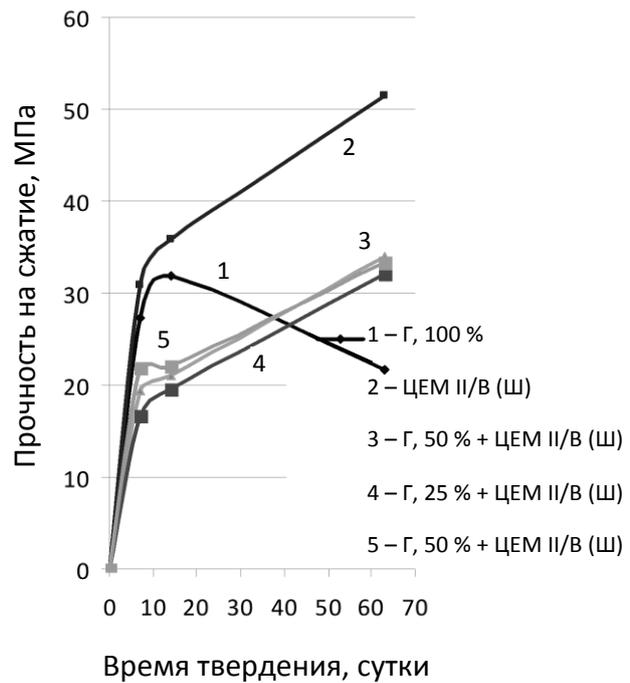


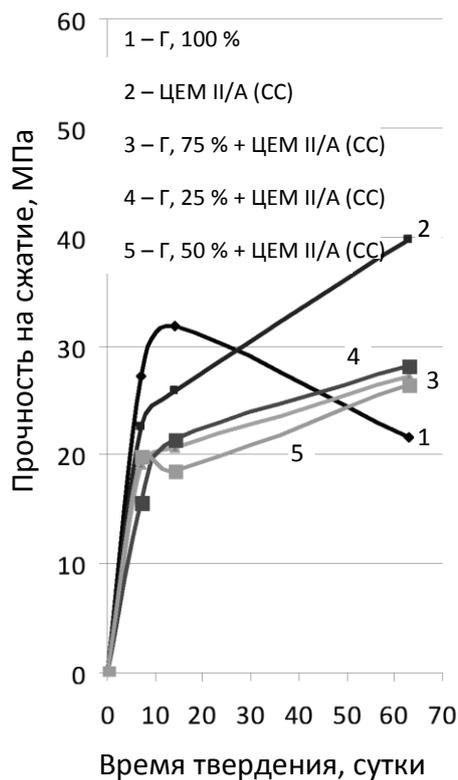
Рис. 1. Динамика твердения гипсоцементного камня на различных видах портландцемента: а – ЦЕМ I; б – ЦЕМ II (Ш); в – ЦЕМ II (СС)



а



б



в

Рис. 2. Динамика твердения гипсоцементного камня на различных видах портландцемента при концентрации пенообразователя 0,3 %: а – ЦЕМ I; б – ЦЕМ II (Ш); в – ЦЕМ II (СС)

Вторым фактором, влияющим на процессы твердения изучаемой системы, является действие применяемого пенообразователя. В возрасте 63 суток для всех цементов имеет место тенденция к повышению прочности при максимальной дозировке пенообразователя. Возможно, это связано с тем, что большое количество пенообразователя, замедляя гидратацию цемента, растягивает во времени и развитие деструктивных процессов, снижает их негативное влияние на прочность. Фактор проявляется тем сильнее, чем хуже цемент относится к совместному твердению с гипсом в ряду ЦЕМ II (Ш) – ЦЕМ II (СС) – ЦЕМ I. При меньших дозировках превалирующим оказывается фактор торможения твердения цемента, при более высоких – подавление деструктивных процессов. Соответственно, в поризованных системах на КГВ допустимо и целесообразно использовать повышенные дозировки пенообразователя, так как это упрощает процесс изготовления и подавляет негативные явления. Неизбежная потеря прочности при этом для ЦЕМ II (Ш) и ЦЕМ II (СС) составит 10–15 %, для ЦЕМ I – максимально до 40–50 %.

На основании проведенных исследований авторы пришли к выводу о том, что из использованных цементов для пенобетона на КГВ подходит ЦЕМ II (Ш) состава гипс – клинкер – минеральная добавка в соотношении 50/20/30. Это позволяет не вводить отдельно минеральную добавку, что упрощает технологию производства. При этом наблюдается минимум деструктивных явлений и прослеживается нейтральное отношение к любым дозировкам пенообразователя. Основными недостатками ЦЕМ II (Ш) являются медленное схватывание. Низкая начальная скорость твердения полностью компенсируется гипсовым вяжущим.

#### **Библиографический список**

1. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 90–101.

2. 3D-printing trends in building and construction industry: a review / Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan, Kah Fai Leong // Virtual and Physical Prototyping. 2017. No. 12 (3). P. 261–276.

3. On the question of mix composition selection for construction 3D-printing / M.Y. Elistratkin, V.S. Lesovik, N.I. Alfimova, I.M. Shurakov // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. P. 218–223.

4. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. The micro silicon additive effects on the fine-grassed concrete properties for 3D-additive technologies // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. P. 131–135.

5. К вопросу изучения особенностей структурообразования композиционных вяжущих для неавтоклавных газобетонов / В.С. Лесовик, М.В. Абси-

метов, М.Ю. Елистраткин, М.А. Поспелова, С.В. Шаталова// Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. № 3. С. 41–47.

6. Material design and performance evaluation of foam concrete for digital fabrication / V. Markin, Venkatesh Naidu Nerella, C. Schröfl, G. Guseynova, V. Mechtcherine // Materials. 2019. Vol. 2433. P. 12–32.

7. Глаголев Е.С., Ермолаева А.Э., Елистраткин М.Ю. Использование ячеистых бетонов в 3D-аддитивной индустрии // Теоретические основы создания эффективных композитов: сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. Белгород, 2018. С. 75–82.

8. Шахова Л.Д., Лесовик В.С. Особенности получения теплоизоляционного пенобетона на синтетических пенообразователях // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 3 (591). С. 51–56.

9. Оптимизация рецептурно-технологических параметров изготовления ячеистобетонной смеси / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, Д.В. Гудов, И.М. Шураков, Е.Е. Корбут // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 2. С. 30–36.

10. Thermal insulating and constructive foamed concrete on a composite gypsum binder / N.V. Chernysheva, S.V. Shatalova, M.Y. Drebezgova, E.N. Lesnichenko // Materials Science Forum. 2020. Vol. 974. P. 125–131.

11. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 27–34.

## **FEATURES OF COMPOSITE GYPSUM BINDERS FOR POROUS COMPOSITES IN CONSTRUCTION PRINTING TECHNOLOGIES**

**Chernysheva N.V., Shatalova S.V.**

***Abstract.** The article considers the possibility of moving away from the traditional formulations of composite gypsum binders, due to the use of Portland cements with various mineral additives, and also examines the effect of the used foaming agent on the hardening process of the system "gypsum – Portland cement with various mineral additives".*

***Keywords:** construction printing, foam concrete, composite gypsum binder, Portland cements with mineral additives.*

Об авторах:

ЧЕРНЫШЕВА Наталья Васильевна – доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород. E-mail: chernysheva56@rambler.ru

ШАТАЛОВА Светлана Вячеславовна – аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru

About the authors:

CHERNYSHEVA Natalya Vasilievna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod. E-mail: chernysheva56@rambler.ru

SHATALOVA Svetlana Vyacheslavovna – Postgraduate Student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod. E-mail: shatalova.sv@yandex.ru

УДК 691.175.3, 620.172.21691.328.2

## **ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОСТНАПРЯЖЕНИЯ В МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЯХ**

**Шевкина А.В., Гавриленко А.В., Баркая Т.Р., Бровкин А.В.**

© Шевкина А.В., Гавриленко А.В.,  
Баркая Т.Р., Бровкин А.В., 2021

***Аннотация.** В статье приведена краткая информация о постнапряжении железобетонных плит, достоинствах, недостатках и перспективах развития технологии. Рассмотрены основные способы моделирования постнапряженных плит в расчетных комплексах. На практическом примере дано сопоставление металлоемкости и некоторых эксплуатационных параметров плит перекрытия без предварительного напряжения возведенного здания и результатов расчета моделей постнапряженных аналогов. Упомянуты возможные области применения такой арматуры в строительстве.*

***Ключевые слова:** преднапряжение, постнапряжение, моностренд, арматурные работы, металлоемкость, строительные технологии.*

В настоящее время монолитное строительство – одна из наиболее перспективных и уже проверенных временем технологий возведения зданий. Однако применение обычного железобетона в изгибаемых конструкциях несет в себе ряд существенных недостатков, таких как небольшая трещиностойкость и жесткость элементов, массивность сечений,

высокий собственный вес и ряд других. Многие эти несовершенства возможно устранить за счет внедрения предварительного напряжения в растянутые зоны конструкций. Процесс преднапряжения монолитных конструкций в условиях строительной площадки – их постнапряжения – был успешно опробован в середине прошлого столетия [1]. За прошедшие десятилетия данная технология стала одним из наиболее востребованных направлений повышения эффективности конструктивных решений.

Технология реализуется следующим образом [2, 3]. Стабилизированные арматурные канаты, покрытые защитной смазкой, помещаются в полипропиленовые трубки для обеспечения свободного перемещения. Далее канаты укладывают в опалубку, фиксируют, затем происходит бетонирование. После набора бетоном необходимой прочности канаты натягиваются с упором на бетон.

В разрезе технологии строительного производства основное отличие постнапряжения от традиционного натяжения арматуры на бетон заключается в исключении этапа инъектирования бетона для заполнения канала [4]. Это определяет особенности работы самой конструкции – арматура и бетон имеют связь лишь в зоне закрепления по торцам элемента, а по длине стержня сцепление с бетоном отсутствует (рис. 1).



Рис. 1. Пример практического применения технологии постнапряжения без сцепления при возведении фундаментной плиты

В отношении применения постнапряжения как технологии, весьма новой для России, возникают вопросы обеспечения ряда эксплуатационных параметров подобных конструкций [5]. К сожалению, на данный момент в отечественной нормативной литературе вопросы о расчете и

конструировании конструкций с предварительным напряжением без сцепления арматуры с бетоном недостаточно изучены.

Ситуация усугубляется и отсутствием в нашей стране значительного опыта эксплуатации данных конструкций. Поэтому в отношении надежности и долговечности постнапряженных без сцепления конструкций у заказчиков и проектировщиков возникают определенные сомнения. В первую очередь это параметры огнестойкости подобных конструкций – при пожаре может произойти потеря натяжения и, как следствие, резкое снижение жесткости элемента в целом. В то же время определенная огнестойкость постнапряженных конструкций будет обеспечиваться, как и у обычных железобетонных элементов, за счет достаточных защитных слоев: как правило, огнестойкость самых распространенных конструкций – серийных преднапряженных многпустотных настилов – не вызывают опасений у заказчиков и проектировщиков, хотя защитный слой их арматуры составляет порядка 30 мм, а диаметр рабочей арматуры в основном не превышает 12–18 мм. Важно учесть, что, как правило, напрягаемые канаты в пролетной зоне находятся поверх сетки ненапрягаемой арматуры, поэтому толщина защитного слоя складывается из защитного слоя бетона, диаметра дополнительной (обычной) арматуры и толщины пластиковой оболочки. Также фактором снижения нагрева канатов является низкая (относительно бетона) теплопроводность пластиковой оболочки и смазки.

Другой вопрос – это сомнения по поводу недостаточной коррозионной стойкости канатной арматуры. Однако, как показывает опыт зарубежных строителей, применение напрягаемых арматурных канатов в пластиковой оболочке со смазкой (монострендов), изготовленных по современным технологиям производства, которые обеспечивают равномерное покрытие канатов специальным смазочным и антикоррозионным составом с дальнейшим экструдированием герметичной оболочки, позволяет получить требуемый уровень стойкости арматуры к агрессивным воздействиям. Это делает возможный спектр применения постнапряженных элементов весьма широким.

Постнапряженные плиты обладают рядом преимуществ с экономической точки зрения в сравнении с ненапрягаемыми перекрытиями. В вопросе улучшения качества конструктивных решений можно выделить несколько основных эффектов от применения постнапряжения:

- уменьшение толщины перекрытий при сохранении несущей способности и жесткости и, как следствие, снижение расхода бетона;

- уменьшение веса плит перекрытий и разгрузку нижерасположенных конструкций здания;

- преднапряжение позволяет настолько уменьшить высоту сечений, что определяющими становятся эксплуатационные параметры эргономического характера (звукоизоляция, зыбкость и пр.);

снижение расхода арматуры при сохранении остальных технических характеристик сечений и конструктивной системы;

повышение несущей способности и жесткости перекрытий, обеспечивающее реализацию конструктивных систем, которые позволяют улучшать качество объемно-планировочных решений здания в целом – уменьшение количества вертикальных несущих конструкций за счет увеличения пролетов, применение безбалочных каркасов и, как следствие, возможность свободной планировки помещений, упрощение потенциальных перепланировок и т. д.;

поскольку технология постнапряжения позволяет эффективно и относительно просто реализовывать предварительное напряжение бетона в монолитном строительстве, решается основная проблема применения преднапряженных конструкций заводского изготовления – ограниченность их конфигураций и типоразмеров;

снижение транспортно-монтажных расходов.

Экономическая эффективность была неоднократно проверена и доказана как зарубежным опытом строительства, так и соответствующими научно-техническими работами. Так, в процессе сертификационных испытаний серии плит пролетом 6 м в Австрии в 2004 г. было показано, что за счет преднапряжения сокращается расход арматуры почти в 2 раза с одновременным уменьшением расхода бетона до 30 %. Об эффективности применения постнапряжения говорится также в ряде других отечественных [6] и зарубежных [1, 7, 8] работ.

Несмотря на описанные преимущества, в нашей стране технология фактически не используется в гражданском строительстве, в то время как в странах Европы, Азии и США в последние 50–60 лет применяется достаточно широко [6, 8].

В РФ и СНГ технология получила малое распространение, поскольку ее внедрению в практику препятствует недостаточность соответствующих отечественных норм и рекомендаций, которые описывают расчет и конструирование подобных элементов, а также отсутствует апробированная, общепринятая методика расчета.

В 2017 г. были сделаны некоторые шаги по изучению нормативной базы. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ выпустило методическое пособие «Конструкции железобетонные монолитные с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. Правила проектирования», однако и оно не содержит методики расчета постнапряженных элементов, что не позволяет инженерам ссылаться на документ в процессе проектирования.

Таким образом, становится актуальной задача по рассмотрению применимости расчетных комплексов (РК) к анализу постнапряженных плит перекрытий, что может поспособствовать внедрению технологии в отечественную строительную практику.

Одной из проблем использования РК является формирование расчетной схемы в программно-вычислительных комплексах общего назначения, основанных на методе конечных элементов. На данный момент существует несколько подходов:

1) использование традиционных типовых конечных элементов с введением в расчетную схему дополнительных условных нагрузок, моделирующих усилия натяжения, в том числе эффект вывешивания при криволинейном расположении стержней [9];

2) моделирование постнапряжения путем введения в схему специальных конечных элементов, которые имитируют усилия натяжения (следует заметить, что такие конечные элементы есть далеко не во всех РК);

3) выбор обычного стержневого конечного элемента, напряжение в котором задается с помощью приложения к нему отрицательной температуры [10].

Целями данной работы были оценка на практическом примере применимости неспециализированных ПВК в анализе монолитных постнапряженных плит, а также сопоставление материалоемкости проектных решений.

Для этого было рассмотрено три варианта монолитных плит перекрытий, находящихся на одинаковой отметке одного и того же жилого много-этажного дома, построенного в Твери в 2013 г. (рис. 2):

1) конструкция плиты перекрытия без предварительного напряжения, реализованная при возведении здания (рис. 3);

2) та же конструкция, рассчитанная в ПВК «Лири Софт», и соответствующая схема армирования, назначенная по результатам этого расчета (рис. 3, 4а);

3) монолитная плита перекрытия с применением предварительного напряжения без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном, рассчитанная и заармированная на основе расчета в ПВК «Лири Софт» (рис. 3, 4б).

Рассмотрение второго варианта необходимо для того, чтобы учесть перерасход арматуры, вероятный при реальном проектировании и возможный заложенный в схеме армирования первого варианта, технические параметры которой выступают в данном случае в качестве контрольных значений. Таким образом, при сопоставительном анализе армирования варианты напрягаемого и ненапрягаемого перекрытий рассмотрены в равных условиях.

В средней части пролетов и в надколонных зонах плиты установлена дополнительная арматура диаметром 12 мм с шагом 200 мм, которая на рис. 3 условно не показана. Общий расход армирования приведен в табл. 1.



Рис. 2. План плиты перекрытия с габаритами в крайних осях

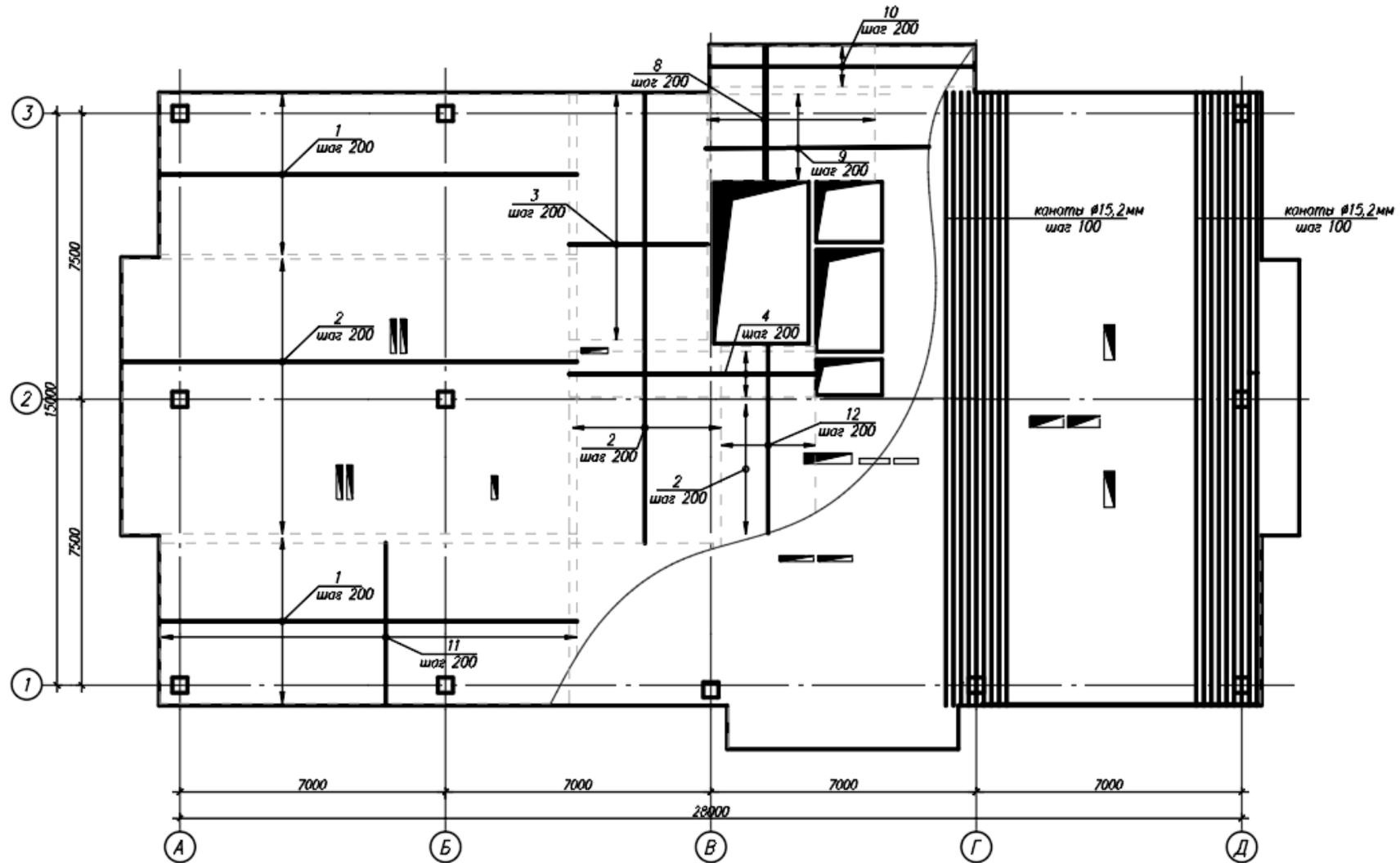
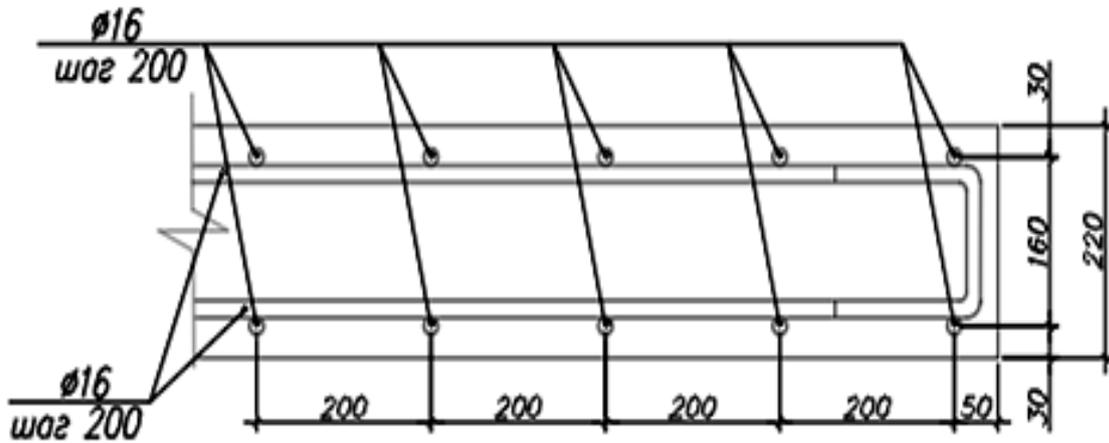
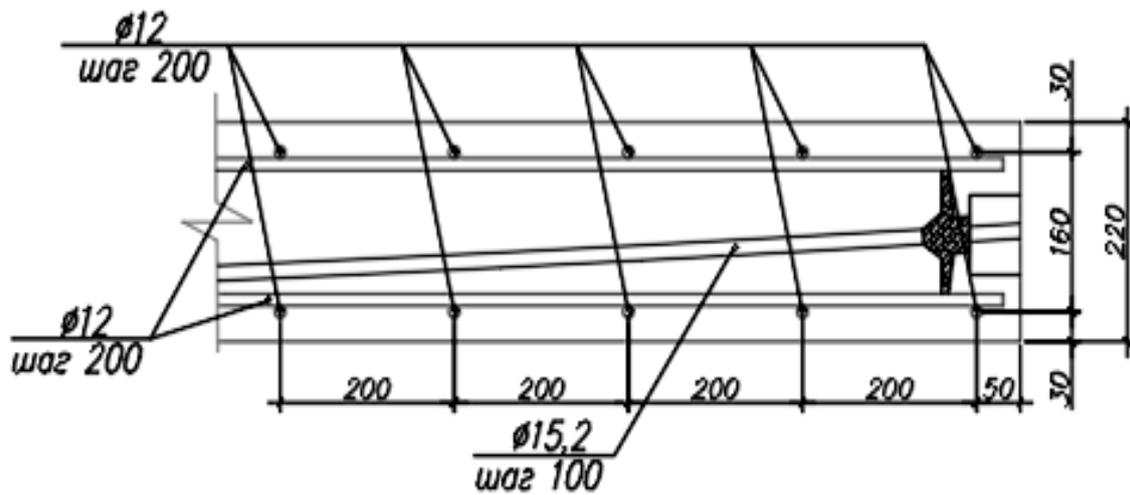


Рис. 3. Фрагмент плана плиты с вариантами раскладки арматуры без напряжения (слева) и с преднапряжением (справа)



а



б

Рис. 4. Варианты армирования сечений плиты:  
а – без преднапряжения; б – с преднапряжением

Таблица 1

Расход фоновой, дополнительной и преднапряженной арматуры  
по вариантам армирования плиты перекрытия

Номер варианта	Фоновая арматура, т	Дополнительная арматура, т	Напрягаемая арматура, т	Общий расход на фрагмент 7×7,5 м, т
1	1,648	0,431	–	1,648
2	1,262	0,381	–	1,262
3	0,927	–	0,09	1,02

Для формирования расчетной схемы в ПВК «Лира Софт» использовались типовые пластинчатые конечные элементы типа № 42 КЭ – тонкая оболочка, № 10 КЭ – пространственный стержень. Для моделирования усилий обжатия в схеме для третьего варианта вводились дополнительные условные нагрузки, подсчитанные по модели Лина [1], согласно которой фактическая раскладка канатов заменяется идеализированной, подразумевающая замену реальной геометрии каната последовательностью парабол и прямолинейных участков. Участок каната над колонной заменяется точечной сосредоточенной силой  $P_y$ , разгружающая (вывешивающая) нагрузка от преднапряжения моделируется равномерно распределенной нагрузкой  $W_b$ , а само преднапряжение задается введением сосредоточенных нагрузок  $N$ , отражающих фактическую раскладку напрягаемой арматуры с заданным шагом.

В качестве напрягаемой арматуры используются канаты диаметром 15,2 мм, группы прочности 1 820 Н/мм<sup>2</sup>. С учетом всех потерь усилие на моностренд составило 146 кН/канат. Несущая конструктивная система модели монолитного железобетонного каркаса в ПВК состоит из фундаментной плиты, опирающихся на нее вертикальных несущих элементов (колонн и стен) и объединяющих их в единую пространственную схему горизонтальных элементов – безбалочных плит перекрытия. Сопряжение плит и колонн – жесткое, реализованное назначением узловых соединений без введения твердых тел. Шаг колонн 7,5 м в поперечном и 7 м в продольном направлении. Обжатию подвергаются пролеты в поперечном направлении (см. рис. 3), толщина плиты составляет 220 мм.

На основании рабочих чертежей и расчетов был определен расход арматуры по всем вариантам, представленный в табл. 1.

В первом варианте при использовании бетона класса В35 расход фоновой арматуры диаметром 16 мм составил 1,648 т. Во втором варианте, где используется тот же бетон класса В35, расход фоновой арматуры диаметром 14 мм равен 1,262 т; в третьем варианте используется бетон на класс ниже В30, с применением напрягаемых канатов расход фоновой арматуры диаметром 12 мм составил 0,927 т. Таким образом, наблюдается существенное снижение расхода ненапрягаемой арматуры в схеме с обжатием.

В табл. 2 представлены значения максимальных прогибов средних пролетов. Данные показывают, что прогиб плиты в схеме с предварительным напряжением составляет 6,46 мм, в то время как прогиб аналогичной плиты без предварительного напряжения оказывается равным 16,62 мм. Тем самым использование предварительного напряжения позволяет существенно повысить жесткость конструкции при сохранении габаритов сечения.

Таблица 2

Значения максимальных прогибов перекрытия

Номер варианта	Максимальный прогиб, мм	Разница, %
2	16,62	61,11
3	6,46	

**Заключение**

В результате проведенной работы установлено, что расход арматурной ненапрягаемой стали на плиту перекрытия с постнапряжением оказывается в 1,4 раза ниже расхода обычной арматуры на плиту без предварительного напряжения. Расход арматурных канатов при этом составил 0,09 т, следовательно, суммарный расход стали на плиту перекрытия с постнапряжением оказался равным 1,02 т, что на 27 % меньше, чем в варианте без преднапряжения. При этом для плиты с постнапряжением удалось снизить класс бетона при сохранении расчетной несущей способности и без ущерба для эксплуатационных параметров: прогибы по сравнению с плитой без преднапряжения оказались меньше на 61,11 %.

Полученные в ходе выполнения работы данные показывают заметную эффективность использования технологии предварительного напряжения без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном.

**Библиографический список**

1. Bondy K. Post-tensioned concrete in buildings past and future an insider's view // PTI Journal. 2006. P. 91–100. URL: <http://www.kenbondy.com/images/ProfessionalArticles/Bondy%20Dec%202006.pdf> (дата обращения: 17.01.2021).
2. Предварительное напряжение монолитных железобетонных конструкций арматурой, не имеющей сцепления с бетоном / Т.Р. Баркая [и др.] // Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2016. С. 41–48.
3. Гавриленко А.В. Изгибаемые элементы, предварительно напряженные арматурой без сцепления с бетоном // Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов ТвГТУ. Материалы научно-практической конференции, приуроченной ко Дню российской науки. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 30–32.

4. Оптимизация технологических процессов пост-напряжения в построечных условиях / Ю.Р. Абдуллина [и др.] // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. № 4 (15). С. 16–22.

5. Шилов С.А., Гавриленко А.В. Проблемы расчета преднапряженных монолитных железобетонных плит // Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: сборник научных трудов. Тверь: ТвГТУ, 2018. С. 50–55.

6. Мадатян С.А. Армирование без сцепления // Технологии строительства. 2009. № 2. URL: [http://www.germostroy.ru/art\\_941.php](http://www.germostroy.ru/art_941.php) (дата обращения: 12.01.2021).

7. Cross E. Post-tensioning in building structures // Austress Freyssinet Pty Ltd. URL: [https://www.academia.edu/7851178/Post\\_tensioning\\_in\\_Building\\_Structures](https://www.academia.edu/7851178/Post_tensioning_in_Building_Structures) (дата обращения: 17.01.2021).

8. Ritz P., Matt P., Schlub P. Post-tensioned slabs // VSL International. 1985. 32 p. URL: [https://www.academia.edu/24503766/POST\\_TENSIONED\\_SLABS](https://www.academia.edu/24503766/POST_TENSIONED_SLABS) (дата обращения: 17.01.2021).

9. Дзюба И.С., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Монолитное большепролетное ребристое перекрытие с постнапряжением // Инженерно-строительный журнал. 2008. № 1. С. 5–12.

10. Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Finite element modelling of unbonded post-tensioned simply supported beam // J. Phys.: Conf. Ser. M., 2019. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1425/1/012131/meta> (дата обращения: 17.01.2021).

## INDICATORS OF EFFICIENCY OF POST VOLTAGE APPLICATION IN MONOLITHIC FLOORS

**Shevkina A.V., Gavrilenko A.V.,  
Barkaya T.R., Brovkin A.V.**

***Abstract.** The article provides brief information on the poststressing of reinforced concrete slabs, the advantages, disadvantages and prospects for the development of technology. The main methods of modeling poststressed plates in computational complexes are considered. On a practical example, a comparison of the metal consumption and some operational parameters of floor slabs without prestressing the erected building and the results of calculating models of poststressed analogs is given. Possible areas of application of such fittings in construction are mentioned.*

***Keywords:** prestressing, poststressing, monostrend, reinforcement works, metal consumption, construction technologies.*

Об авторах:

ШЕВКИНА Анна Владимировна – магистрант кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: a\_shevkina@list.ru

ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь, e-mail: gawaw@mail.ru

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: btrs@list.ru

БРОВКИН Андрей Викторович – доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: kalinin\_kb@inbox.ru

About the authors:

SHEVKINA Anna Vladimirovna – Master Student of the Department of Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver. E-mail: a\_shevkina@list.ru

GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gawaw@mail.ru

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver. E-mail: btrs@list.ru

BROVKIN Andrey Viktorovich – Associate Professor of the Department of Structures and Facilities, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kalinin\_kb@inbox.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Артемов А.А., Лепехин И.А., Ефимов И.Д.</i> Моделирование как инновационное направление развития землеустройства в России.....	8
<i>Бахтин А.С., Любомирский Н.В., Бахтина Т.А., Биленко Г.Р.</i> Влияние принудительной карбонизации на свойства гипсоизвестковых систем на основе вторичного сырья.....	21
<i>Белов В.В.</i> К вопросу о подготовке инновационных инженеров – менеджеров инноваций.....	30
<i>Белов В.В., Курятников Ю.Ю.</i> Сухие смеси для изготовления ячеистого бетона: современное состояние проблемы, экспериментальные исследования, перспективы производства и применения.....	37
<i>Белов В.В., Смирнов М.А.</i> Использование глинистого сырья в качестве безобжигового вяжущего.....	59
<i>Бурьянов А.Ф., Булдыжова Е.Н., Гальцева Н.А.</i> Модификация структуры ангидритового вяжущего комплексной добавкой.....	65
<i>Горохов Т.И., Ерофеев А.В., Данилов В.М.</i> Влияние величины смещения полюса прямых температур по оси $\sigma$ на термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова....	70
<i>Данилов В.М., Ерофеев А.В., Горохов Т.И.</i> Определение исходных данных для расчета термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова для поливинилхлоридных плит составного сечения.....	75
<i>Кузнецов В.А., Ярцев В.П.</i> Разработка программы по расчету теплопотерь и затрат на отопление каркасно-панельных и брусковых сооружений.....	80
<i>Кульков С.А., Канаев О.В.</i> Инженерно-техническое обследование реконструируемого здания отопительной котельной в г. Домодедово...	84
<i>Куляев П.В., Сизов Ю.В.</i> Влияние гранулометрии частиц и активности цемента и добавок на механические характеристики растворов и бетонов.....	91

<i>Нгуен Дык Винь Куанг, Александрова О.В., Булгаков Б.И.</i> Влияние минеральных добавок на физико-механические и эксплуатационные свойства бетона.....	100
<i>Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю.</i> Облегченные гипсовые материалы.....	106
<i>Самченко С.В., Османов А.Б., Абрамов М.А.</i> К вопросу о получении и применении реакционно-порошкового бетона.....	115
<i>Севостьянов А.В., Ерофеев А.В.</i> Утепление стен с внутренней стороны помещения пенополистиролом марки ПСБ-С25.....	122
<i>Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В.</i> Возможность использования золы-уноса и золы рисовой шелухи для получения геополимерных бетонов.....	126
<i>Ткач Е.В., Петропавловский К.С.</i> Влияние механоактивации фосфогипсовой сырьевой смеси на гидратацию и твердение ангидритового вяжущего.....	132
<i>Трофимов В.И., Ясюкович В.А.</i> Учет влияния формы пустотообразователей на напряженное состояние бетона.....	138
<i>Фишер Х.-Б., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю.</i> Эффективное применение принудительной карбонизации при получении гипсовых композитов...	145
<i>Чернышева Н.В., Глаголев Е.С., Моторыкин Д.А., Бочарников А.Л.</i> Реологические свойства гипсоцементных формовочных смесей для 3D-технологий малоэтажного строительства.....	151
<i>Чернышева Н.В., Шаталова С.В.</i> Особенности композиционных гипсовых вяжущих для поризованных композитов в технологиях строительной печати.....	158
<i>Шевкина А.В., Гавриленко А.В., Баркая Т.Р., Бровкин А.В.</i> Показатели эффективности применения постнапряжения в монолитных перекрытиях.....	166

# **Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве**

Материалы V Международной научно-практической конференции  
18 февраля 2021 г., Тверь

Редактор Я.А. Петрова  
Корректор Е.В. Фомкин

---

Подписано в печать 22.12.2021

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 11,25

Тираж 50 экз.

Усл. печ. л. 10,46

Заказ № 80

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 9,79

С – 78

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22