

В печать
18.03.2021



На правах рукописи

Вишторский Евгений Михайлович

**ПЕНОБЕТОНЫ НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ
ИЗ СМЕСЕЙ С НИЗКИМ ВОДОТВЕРДЫМ ОТНОШЕНИЕМ**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2021

Работа выполнена на кафедре городского строительства и хозяйства в институте строительства, архитектуры и ЖКХ ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Ефремов Александр Николаевич**, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», профессор кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов.

Официальные оппоненты: **Сучков Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, г. Нижний Новгород.

Нагорная Нина Павловна, кандидат технических наук, доцент, ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», доцент кафедры товароведения, г. Донецк.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»**, г. Оренбург

Защита состоится «27» мая 2021 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры" по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний учёного совета. Тел. факс: +38(062) 343-70-33, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры" по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан " ____ " _____ 20 ____ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 01.006.02



Лахтарина Сергей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ячеистые бетоны – наиболее перспективный материал для ограждающих конструкций. Из всех бетонов он характеризуется минимальной потребностью в сырье, масса квадратного метра, например, наружной стены, тоже минимальна и составляет 150-170 кг. В производстве изделий из ячеистых бетонов используется значительное количество промышленных отходов таких, как золы тепловых электростанций, металлургические шлаки, что для условий Донбасса весьма актуально. Себестоимость кубометра изделий из ячеистого бетона одна из самых низких и соизмерима с себестоимостью таких материалов как шлакоблок, фундаментные блоки и т.п.

О перспективности производства ячеистых бетонов свидетельствует и тот факт, что в экономически благоприятные 2000-2013 годы в Российской Федерации при росте объема строительства жилья в 2,5 раза объем производства ячеистобетонных изделий вырос в семь раз.

Из двух видов этого материала – газобетона и пенобетона, ещё в конце 80-х годов прошлого века более 90 % от общего объема составляло производство газобетона. Это объяснялось тем, что вследствие использования пенообразователей – сильных замедлителей твердения цемента, для набора пластической прочности бетонного сырца, необходимой для начала тепловлажностной обработки, время выдержки возрастало с 4-8 до 8-24 часов, что существенно увеличивало цикл и металлоёмкость производства. В то же время пенобетон характеризуется более мелкой и замкнутой пористостью, что при прочих равных условиях, уменьшает теплопроводность и сорбционное увлажнение. Совершенствование технологии пенобетонов способствовало увеличению доли их производства в Российской Федерации за указанный период до более, чем 45 %.

Общим недостатком ячеистых бетонов является высокое водотвердое отношение (В/Т), что снижает прочность и трещиностойкость бетонов, особенно неавтоклавных, за счёт высокой усадки. При использовании современных пенообразователей в комплексе с водоредуцирующей добавкой можно снизить В/Т при обеспечении требуемой текучести бетонной смеси, а снижение скорости твердения за счёт их введения компенсировать применением ускорителя твердения цемента. Это приблизит по качеству неавтоклавный пенобетон к более энергоёмкому автоклавному.

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках госбюджетной научно-исследовательской тематики Луганского государственного университета имени Владимира Даля: БЖ-2-20 «Разработка модифицированных строительных композитов с перспективами ресурсо- и энергосбережения в строительстве».

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой для выполнения исследований неавтоклавных пенобетонов из смесей с низким В/Т являются работы: П. П. Дерябина, К. Э. Горяйнова, Ю. П. Горлова, А. П. Меркина, Л. В. Моргун, А. Б. Стешенко, Л. Д. Шаховой, А. В. Хитрова, E. P. Kearsley, M. R. Jones, E. K. K. Nambiar и др.

В работах А. Б. Стешенко, Н. В. Павленко, Д. А. Киселева рассмотрено комплексное применение пенообразователей и пластификаторов в пенобетонах, од-

нако процессы пеногашения при совместном действии разнонаправленных поверхностно-активных веществ изучены недостаточно, что требует дополнительных исследований в этой области.

Цель исследования – теоретическое и экспериментальное обоснование получения неавтоклавных пенобетонов с повышенными показателями качества за счёт снижения В/Т пенобетонной смеси и установления закономерностей влияния комплексной химической добавки «водоредуцирующая добавка («Хемикс Art-2», «BASF Master Glenium 115», «Sika Mix Plus», «Форт УП-2») + ускоритель схватывания (Na_2SO_4) на структуру ячеистых пор и межпоровых перегородок.

Задачи исследования:

- теоретически установить наиболее перспективные химические пенообразователи и добавки-модификаторы для производства качественного пенобетона, экспериментально проверить их эффективность и совместимость;
- установить зависимости рецептурно-технологических параметров пенобетона по его средней плотности и прочности, исследовать влияние добавок на изменение структуры ячеистых пор и межпоровых перегородок пенобетона, фазовый состав продуктов твердения композиций;
- исследовать влияние комплексной добавки «водоредуцирующая добавка + ускоритель твердения бетона» на технологические и эксплуатационные свойства неавтоклавных пенобетонов;
- разработать технологический регламент производства неавтоклавного пенобетона, осуществить опытно-промышленное внедрение результатов исследования и оценить их экономическую эффективность.

Объект исследования – пенобетоны неавтоклавного твердения на основе портландцемента и золы-уноса тепловых электростанций (ТЭС) из смесей с низким В/Т.

Предмет исследования – закономерности влияния рецептурно-технологических факторов на процессы структурообразования, технологические и эксплуатационные свойства неавтоклавных пенобетонов из смесей с низким В/Т.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность получения неавтоклавных пенобетонов с повышенными технологическими и эксплуатационными свойствами при снижении В/Т на 30-50 % за счёт использования белкового пенообразователя «Эталон» в комплексе «водоредуцирующая добавка «Хемикс Art-2» и ускоритель твердения бетона Na_2SO_4 »;
- установлено, что за счёт водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» и ускорителя твердения Na_2SO_4 уменьшается замедляющее воздействие поверхностно-активных веществ на скорость схватывания и твердения пенобетонных смесей при одновременном снижении их водопотребности на 30-50 %, а оптимальное количество химических добавок «Хемикс Art-2» и Na_2SO_4 обеспечивает стабильную ячеистую структуру пенобетонов;
- рентгенофазовым анализом установлено, что с увеличением времени нормального твердения пенобетона интенсивность дифракционных отражений портландита ($d = 4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,45; 1,31 \text{ \AA}$) снижается, а после тепловлаж-

ностной обработки они исчезают. Рефлекс тоберморитоподобных гидросиликатов типа CSH(II) ($d = 3,07; 2,10 \text{ \AA}$) усиливаются, их дополнительное образование уплотняет и «залечивает» дефекты припорового слоя межпоровых перегородок, что приводит к существенному повышению эксплуатационных характеристик материала.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- дополнены представления о процессах гидратации и фазовом составе продуктов твердения неавтоклавных пенобетонов из смесей с низким В/Т, что позволит рационально проектировать составы пенобетонов;

- разработан технологический регламент производства теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных пенобетонных изделий неавтоклавного твердения со средней плотностью от D400 до D600, осуществлено внедрение результатов исследований в строительной фирме ООО «Домостроительный комбинат» (г. Луганск, ЛНР);

- установлено, что годовой экономической эффект от внедрения результатов исследований на предприятии по производству неавтоклавного пенобетона мощностью 5000 м³/год из смесей с низким В/Т составит 1348903 руб., или 269,7 руб./м³;

- результаты исследований внедрены в учебный процесс Луганского государственного университета имени Владимира Даля при подготовке бакалавров направления 08.03.01 «Строительство» по дисциплине «Строительные материалы» и магистров направления 08.04.01 «Строительство» по дисциплинам «Проектирование энергоэффективных зданий» и «Перспективы развития строительного материаловедения, ресурсо- и энергосбережения в городском строительстве».

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования послужили основные положения теории композиционных материалов и строительного материаловедения в области ячеистых бетонов.

Исходные материалы и процессы структурообразования вяжущих исследовались методами химического и рентгенофазового анализов (установка «Дрон-4-07»). Физико-механические свойства вяжущих и бетонов изучались с применением стандартных и общепринятых методов. Оптимальные соотношения компонентов бетонов определялись с использованием экспериментально-статистического метода моделирования. Для обработки и анализа результатов экспериментов применены методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- экспериментальные исследования совместимости и эффективности пенообразователей и водоредуцирующих добавок в пенобетонных смесях;

- результаты исследования влияния комплексной химической добавки на структуру, физико-механические и эксплуатационные свойства пенобетонов;

- составы пенобетонов с низким В/Т и повышенными физико-механическими свойствами, оптимизированные посредством математического планирования трёхфакторного эксперимента, с применением программно-алгоритмического средства обработки данных «Plan-Exp B-D13» и «MathCad»;

– механизм физико-химических явлений и основные закономерности гидратации вяжущего в неавтоклавных пенобетонах с низким В/Т в нормальных условиях и при тепловлажностной обработке.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных результатов базируется на основных законах строительного материаловедения и физической химии силикатов, на применении стандартных и общепринятых методов исследований, использовании поверенного оборудования, высокой воспроизводимости полученных результатов, которые не противоречат данным, приведённым в публикациях по близкой тематике.

Основные положения диссертации доложены на:

- научно-практической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы современной науки», (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 11-14 декабря 2017 г.); I Международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2017» (ГОУ ВПО «ДонНАСА», г. Макеевка, 20-22 апреля 2017 г.); II Региональной научно-практической конференции «Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации» (ГОУ ВПО ЛНР ЛНУ им. В. Даля, 28 сентября 2017); II Международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2018» (ГОУ ВПО «ДонНАСА», г. Макеевка, 19-21 апреля 2018); III международной научно-практической конференции «Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации» (г. Луганск, ГОУ ВПО ЛНУ им. В.И. Даля, 25 октября 2018 г.); Республиканской научно-технической конференции «Реконструкция и восстановление Донбасса. Строительные материалы, конструкции и изделия», (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 28 ноября 2018 г.); конференции «Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса» (г. Луганск, ГОУ ВПО ЛНУ им. В.И. Даля, 3 декабря 2018 г.); международной конференции «Научные чтения памяти доцента кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Александра Дмитриевича Лазько» (ГОУ ВПО «ДонНАСА», г. Макеевка, 27 декабря 2018 г.); III Международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2019» (ГОУ ВПО «ДонНАСА», г. Макеевка, 18-20 апреля 2019 г.); IV международной очно-заочной научно-практической конференции молодых учёных и студентов «Актуальные проблемы развития городов» (ГОУ ВПО «ДонНАСА», г. Макеевка, 27 февраля 2020 г.); конференции «Материаловедение XXI века», III международная студенческая научно-практическая конференция (г. Луганск, ГОУ ВПО ЛНУ им. В.И. Даля, 4 марта 2020 г.); IV Международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2020» (ГОУ ВПО «ДонНАСА», г. Макеевка, 16-18 апреля 2020 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 14 научных работах, в том числе шесть публикаций – в рецензируемых научных изданиях, шесть – по материалам научных конференций, две – в других изданиях.

Общий объем публикаций – 3,49 п.л., из которых – 2,09 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников (162 наименований) и приложений. Общий объем работы составляет 152 страницы, в том числе 133 страницы основного текста, 27 полных страниц с рисунками и таблицами, 17 страниц списка использованных источников, шесть страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выдвинуты теоретические предпосылки и основная научная гипотеза, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, указаны научная новизна и практическое значение работы, приведена информация о структуре и объеме диссертации, публикациях и апробации работы.

В первом разделе проанализировано состояние вопроса и проблемы улучшения качества неавтоклавных цементных пенобетонов, изложены теоретические предпосылки исследований, на основе которых сформулирована научная гипотеза диссертационной работы.

При рассмотрении основных направлений технологии неавтоклавных пенобетонов отмечено, что наиболее распространёнными методами приготовления пенобетонной смеси являются: классическая раздельная технология, метод «сухой минерализации» и баротехнология. Потребность в малых мобильных производствах изделий из пенобетона и возможность использования недорогих белковых и синтетических пенообразователей привели к созданию малоэнергоёмкой одностадийной технологии изготовления пенобетонов.

При использовании одностадийной технологии производства пористая структура пенобетона полностью формируется в очень короткий отрезок времени при интенсивных динамических воздействиях (механическом перемешивании). Поэтому температура окружающей среды, точность дозировки компонентов, постоянство свойств вяжущего и кремнезёмистого компонента не оказывают столь сильного влияния на конечные свойства получаемого материала.

Для большинства пеноматериалов предпочтительно получить замкнутую структуру ячеек, так как такие материалы обладают лучшими теплоизоляционными свойствами. При рассмотрении показателей прочности высокопористого цементного камня необходимо выделять прочность самого цементного теста в межпоровом пространстве и прочность пористого композиционного материала. В связи с вышеизложенным, необходимо максимизировать прочность при максимально возможном уменьшении плотности изделия. Этого можно достичь за счёт оптимизации цементных материалов и выбора высококачественных пенообразователей и кремнезёмистых компонентов.

Технология неавтоклавного пенобетона является перспективной и ее развитие имеет огромное практическое значение. Но существует ряд проблем, к которым относят:

- совместимость пенообразующих и водоредуцирующих химических добавок, а также их влияние на вяжущее;

- стабильность пен и пенобетонной массы;
- отсутствие тепловых агрегатов на существующих производственных линиях по изготовлению пенобетонных изделий;
- недостаточный профессиональный уровень обслуживающего персонала при производстве пенобетонов;
- отсутствие в оснащении технологических линий необходимой технологической документации.

Применение ряда минеральных добавок в пенобетонах связано с проблемами увеличения В/Т, в связи с этим рекомендуется совместное использование как минеральных, так и химических водоредуцирующих добавок. Воздействуя на поверхностные явления и микроструктуру смеси, добавки позволяют управлять ее свойствами и способствовать получению оптимальной структуры пенобетона. Также для снижения усадки уменьшают расход цементного вяжущего.

Во втором разделе для выполнения поставленных в работе задач разработана блок-схема теоретических и экспериментальных исследований неавтоклавных пенобетонов из смесей с низким В/Т, которая состоит из четырёх основных блоков: I – теоретические предпосылки и состояние вопроса получения неавтоклавных пенобетонов из смесей с низким В/Т; II – выбор исходных сырьевых материалов и методов исследований; III – экспериментальные исследования свойств пенообразователей и химических добавок, цементного теста и камня, вспененного цементного камня и пенобетона; IV – внедрение результатов научных исследований.

При проведении экспериментальных исследований в качестве исходных материалов были использованы следующие материалы:

- портландцемент типа ЦЕМ-I 42,5 Н производства Амвросиевского цементного завода, Объединение «Цемент Донбасса» (п.г.т. Новоамвросиевское, Амвросиевский район), отвечающий требованиям ГОСТ 30515-2013 «Цементы. Общие технические условия» и ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» ($S_{уд.}=357 \text{ м}^2/\text{кг}$; НГ=27 %, $R_{28}=51,2 \text{ МПа}$);

- кремнезёмистый компонент - зола-уноса Зуевской ТЭС, г. Зугрэс, Республиканское предприятие «Энергия Донбасса», относящаяся к кислым золам, которая образуется при сгорании каменного угля и отвечает всем требованиям ГОСТ 25818-2017 «Зола уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия». Химический состав золы-уноса представлен оксидами: SiO_2 – 56,31 %; Al_2O_3 – 19,42 %; Fe_2O_3 – 7,53 %; CaO – 6,84 %; FeO – 2,77 %; MgO – 1,96 %; $\text{CaO}_{\text{св.}}$ – 1,05 %; K_2O – 2,12 %; Na_2O – 0,27 %; SO_3 – 0,74 %; TiO_2 – 1,02%; P_2O_5 – 0,11 %; MnO – 0,009 %; S – 0,04 %; ППП – 0,59 %. По показателю дисперсности зола-унос относится к третьему классу, характеризующимся остатком на сите с размером ячеек 45 мкм свыше 40 %.

- пенообразователи: синтетический «ПО-6НП» по ТУ 38-00-05807999-33-95 и протеиновый «Эталон» по ТУ 2483-003-13420175-2015;

- химические водоредуцирующие добавки: «Хемикс Art-2» и «Форт УП-2» российского производства, «BASF Master Glenium 115» (БМГ) немецкого произ-

водства, «Sika Mix Plus» швейцарского концерна. Технические характеристики этих добавок представлены в таблице 1;

- ускоритель твердения бетона - сернокислый натрий СН (Na_2SO_4) по ГОСТ 6318-77 «Натрий сернокислый технический».

Таблица 1 – Технические характеристики водоредуцирующих добавок

Наименование показателя	«Хемикс Art-2»	«BASF Master Glenium 115»	«Sika Mix Plus»	«Форт УП-2»
Внешний вид	Прозрачная жидкость бежевого цвета	Однородная жидкость светло-жёлтого цвета	Жидкость темно-коричневого цвета	Сухой порошок коричневого цвета
Показатель активности водородных ионов H^+ (рН) 1 % водного раствора	5,0-8,0	5,0-8,0	5,5-7,5	4,5 – 5,0
Коррозионная агрессивность	отсутствует	отсутствует	отсутствует	отсутствует
Плотность, г/см ³	1,01	1,05-1,09	0,99-1,03	-
Массовая доля сухого вещества, %	-	-	-	91 - 97

При выполнении экспериментальных исследований использовались стандартные методы исследований. Приготовление пенобетонных смесей производилось с помощью лабораторного смесителя, установленного на штативе. Скорость вращения рабочего органа (венчиков) составляет 1000 об/мин.

Рентгенофазовые исследования пенобетона выполнены на установке «Дрон-4-07». Условия съёмки дифрактограмм: медное излучение с длиной волны $\lambda=0,154178$ нм при ускоряющем напряжении 27 кВ и токе 15 мА; щели для съёмки 0,5×4×0,25 мм (0,5 – вертикальная коллимационная щель; 4 – горизонтальная коллимационная щель; 0,25 – щель на детекторе). Съёмка дифрактограмм осуществлялась в пошаговом режиме ($2\theta=10-80^\circ$ с шагом $0,1^\circ$ и временем экспозиции 5 с). Для дальнейшей работы с полученными значениями интенсивностей основных минералов пенобетона, текстовые файлы результатов с установки «Дрон-4-07» были конвертированы в программном комплексе «Origin» в электронный формат с расширением *.DAT, дальнейшая работа по расшифровке производилась в программном комплексе «Match! – Phase Identification from Powder Diffraction». Из-за сложности определения гидросиликатов кальция в рентгенограммах по предоставленным разработчиком базам данных минералов, было решено выполнить поиск по определённым ранее (автоматически) межплоскостным расстояниям в стандартных таблицах идентификационных характеристик.

Оптимизация состава пенобетона выполнена при помощи программно-алгоритмического средства обработки данных «PlanExp B-D13». Проверка значимости коэффициентов математических моделей выполнена по критерию Стью-

дента. Адекватность математических моделей проверена по критерию Фишера. Графическая интерпретация результатов выполнена в программном комплексе «Mathcad».

Определение макроструктуры поризованного цементного камня выполнено с помощью стереомикроскопа «Technival 2».

Теплопроводность изучена прибором «МИТ-1», предназначенным для оперативного определения теплопроводности и термического сопротивления строительных и теплоизоляционных материалов зондовым методом в соответствии с ГОСТ 30256-94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом».

Тепловлажностная обработка (ТВО) пенобетона осуществлялась при температуре 85°C по режиму 2+8+2 после предварительной выдержки не менее 8 часов.

Средняя плотность, подвижность растворной и пенобетонной смеси, нормальная густота и сроки схватывания цементного теста определены согласно стандартным методикам.

Прочность на сжатие цементного камня определена на образцах размером 0,03x0,03x0,03 м, пенобетона - на образцах размером 0,07x0,07x0,07 м по ГОСТ10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Исследования усадки изучено по ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».

Морозостойкость пенобетона выполнена по ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».

В третьем разделе приведены результаты по оценке эффективности пенообразователей различной химической природы по критериям кратности и стабильности, в том числе и с применением химических водоредуцирующих добавок. Представлено влияние водоредуцирующих добавок на сроки схватывания цементного теста и прочность цементного камня, а также приведены результаты по установлению влияния В/Т на свойства пеноцементной смеси и поризованного цементного камня.

Получены показатели кратности и стабильности пен при различных концентрациях пенообразователей «Эталон» и «ПО-6 НП». Определена оптимальная концентрация для белкового пенообразователя «Эталон», которая составила 2 %. Для синтетического пенообразователя «ПО-6 НП» оптимальные показатели кратности и стабильности достигаются при 4 % концентрации водного раствора. Для дальнейших исследований принят белковый пенообразователь «Эталон».

Важной особенностью при приготовлении пенобетонной смеси по одностадийной технологии является совместимость пенообразователя с другими применяемыми химическими добавками. Так, при проведении данного исследования установлено, что добавки «Sika Mix Plus» и «Хемикс Art-2» улучшают исходные свойства пены, а добавка «Форт УП-2» характеризуется несколько сниженными показателями кратности и стабильности в сравнении с добавками «Sika Mix Plus» и «Хемикс Art-2».

Применение водоредуцирующей добавки «BASF Master Glenium 115» оказывает пеногасящее действие на полученную пену «Эталон».

Обладая большей поверхностной активностью, «BASF Master Glenium 115» вытесняет из поверхностного слоя молекулы пенообразователя. Для дальнейших исследований приняты водоредуцирующие добавки: «Sika Mix Plus», «Хемикс Art-2» и «Форт УП-2».

Составы цементного теста с применением данных химических добавок представлены в таблице 2. Прочность на сжатие цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения приведены на рисунке 1.

Таблица 2 – Расход водоредуцирующих добавок, % от массы цемента

№ п/п	Наименование добавок		
	«Хемикс Art-2»	«Sika Mix Plus»	«Форт УП-2»
1	-	-	-
2	0,65	-	-
3	0,85	-	-
4	1,1	-	-
5	-	0,05	-
6	-	0,1	-
7	-	0,2	-
8	-	-	0,5
9	-	-	0,6
10	-	-	0,7

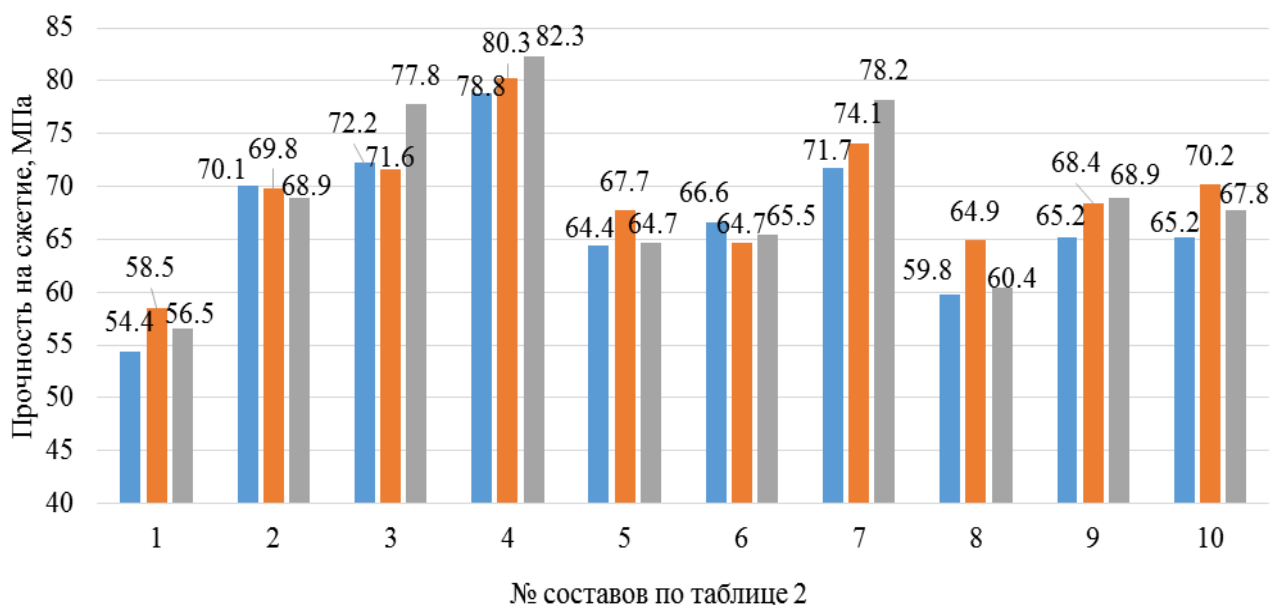


Рисунок 1 – Прочность на сжатие цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения

Наиболее эффективной химической добавкой является «Хемикс Art-2» в количестве 1,1 % от массы цемента (состав №4), дающей прирост прочности на 28-30 %. Очевидно, «Хемикс Art-2» на основе эфиров поликарбоксилатов прикрепляется к поверхности цементного зерна в основном точно и характеризуются пространственным строением молекулы с разветвлёнными боковыми цепями, что способствует более эффективной диспергации цементных флокулов за счёт стерического эффекта, а также позволяет обеспечить доступ воды к клинкерным минералам.

Составы поризованного цементного камня представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы поризованного цементного камня

Группа составов	№ состава	В/Т	Текущность, см		Плотность кг/м ³		Прочность в 28 сут, МПа
			растворной смеси	вспененной смеси	вспененной смеси	вспененного цементного камня	
А	1. Контрольный	0,42	19,5	11	686	612	2,5
	2. 0,65% Хемикс Art-2	0,42	39	14,5	598	477	1,5
	3. 0,5% УП-2 + 1% СН	0,42	20	11,2	609	489	1,7
	4. 0,05% Sika + 1% СН	0,42	19,5	14	695	555	2,5
Б	1. Контрольный	0,4	18,5	10	789	662	2,9
	2. 0,85% Хемикс Art-2	0,4	35	16	633	506	1,8
	3. 0,6% УП-2 + 1% СН	0,4	20	11,3	609	511	1,9
	4. 0,1% Sika + 1% СН	0,4	16,5	13	718	602	2,5
В	1. Контрольный	0,38	15,5	9	982	790	4,8
	2. 1,1% Хемикс Art-2 + 1% СН	0,38	39	18	668	553	3,3
	3. 0,7% УП-2 + 1% СН	0,38	16,5	12,2	722	602	2,3
	4. 0,2% Sika + 1% СН	0,38	16,5	12,2	893	719	4,1

На рисунках 2-4 приведены зависимости плотности и прочности поризованного цементного камня с применением водоредуцирующих добавок различного химического действия от В/Т.

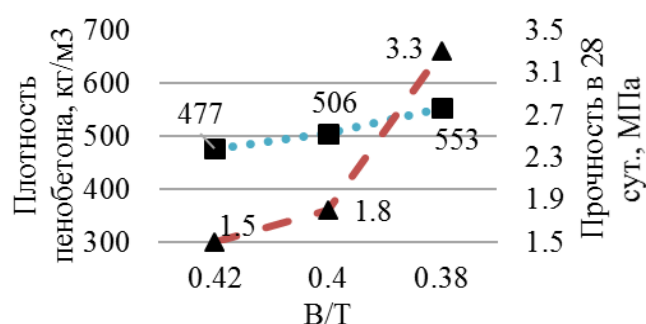


Рисунок 2 - Зависимость плотности и прочности поризованного цементного камня с применением водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» от В/Т

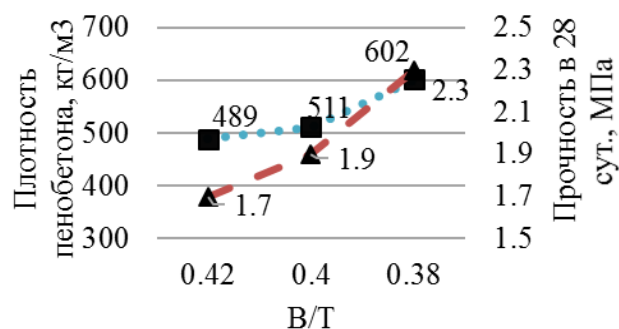


Рисунок 3 - Зависимость плотности и прочности поризованного цементного камня с применением водоредуцирующей добавки «Форт УП-2» от В/Т

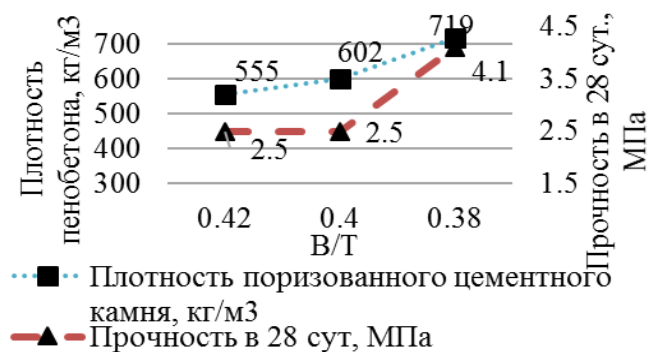


Рисунок 4 - Зависимость плотности и прочности поризованного цементного камня с применением водоредуцирующей добавки «Sika Mix Plus» от В/Т

Из рисунков 2-4 следует, что со снижением В/Т повышается плотность поризованного цементного камня, что влечёт за собой и повышение прочности. При уменьшении В/Т с 0,4 до 0,38 и увеличении количества добавки «Хемикс Art-2» с 0,85 до 1,1 % от массы цемента (рисунок 2) прочность поризованного цементного камня в 28 суток возросла с 1,8 до 3,3 МПа, однако плотность повысилась незначительно, с 506 до 553 кг/м³.

С использованием добавки «Форт УП-2» (рисунок 3) в пределах В/Т 0,42-0,4 плотность и прочность существенно не изменилась, однако при дальнейшем снижении В/Т до 0,38 плотность возрастает с 511 до 602 кг/м³, что служит причиной повышения прочности с 1,9 до 2,3 МПа в марочном возрасте.

Применение водоредуцирующей добавки «Sika Mix Plus» (рисунок 4) в пределах В/Т 0,42-0,4 характеризуется одинаковыми показателями прочности – 2,5 МПа, однако плотность изменяется с 555 до 602 кг/м³. С уменьшением В/Т до 0,38 плотность увеличивается до 719 кг/м³.

Изучение процессов формирования структуры поризованного цементного камня проводилось с использованием микроскопии. Для исследований выбраны составы групп А и В, которые представлены в таблице 4. Результаты сравнения структуры образцов представлены на рисунках 5-8.



Рисунок 5 - Макроструктура состава №1 группы А.

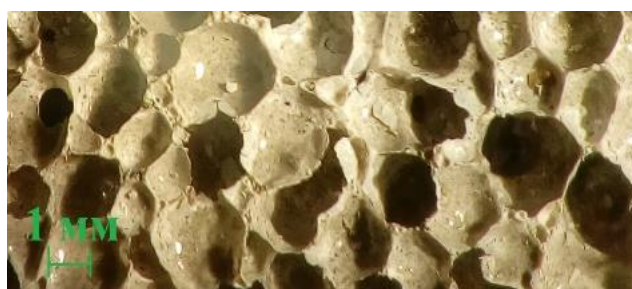


Рисунок 6 - Макроструктура состава №2 группы А

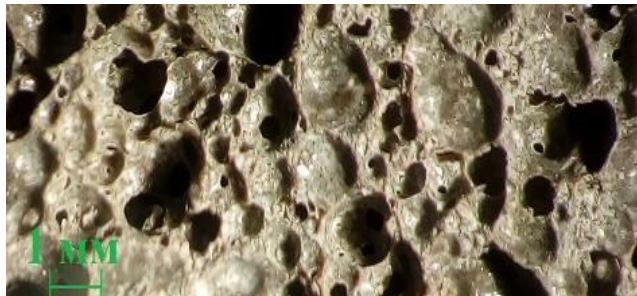


Рисунок 7 - Макроструктура состава №2 группы В



Рисунок 8 - Макроструктура состава №3 группы В

В бездобавочном контрольном составе №1 группы А наблюдается интенсивная деформация стенок пор, с последующим объединением этих пор (рисунок 5), что способствует развитию процесса седиментации, снижению однородности макроструктуры полученного пенобетона.

Добавление водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» в составы №2 групп А и В в количестве 0,65 и 1,1 % от массы цемента способствует дополнительному воздухововлечению, за счёт чего образуются замкнутые мелкодисперсные поры. Также стабилизируется структура пенобетона (рисунки 6 и 7) и обеспечивается отсутствие протекания жидкости в стенках пор, которое наблюдается в контрольном образце пенобетона без добавок. Данные составы имеют форму пор близкой к сферической. Состав № 2 группы В имеет большее количество пор различного размера и, благодаря этому, максимально заполняют структуру ячеистого бетона.

Очевидно, межпоровые перегородки имеют достаточную толщину для обеспечения изоляции пор и достаточной прочности структуры, что подтверждается данными рисунка 2.

В четвёртом разделе приведены результаты по оптимизации состава пенобетона неавтоклавного твердения по критериям средней плотности и прочности, выполнены исследования по выявлению закономерностей влияния кремнезёмистого компонента и условий твердения на прочность пенобетонов. Приведены результаты рентгенофазового анализа продуктов гидратации неавтоклавных пенобетонов с низким В/Т и определены их эксплуатационные свойства.

Матрица планирования эксперимента и выходные параметры опытов представлены в таблице 4. Факторы и интервалы их варьирования - в таблице 5.

Таблица 4 - Матрица планирования эксперимента и выходные параметры опытов

Номер опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр - средняя плотность, кг/м ³			Выходной параметр - прочность в 28 сут, МПа		
	X ₁	X ₂	X ₃	В/Т	Хемикс, % от Ц	Время пер. t, мин	y(u, 1)	y(u, 2)	y(u, 3)	y(u, 1)	y(u, 2)	y(u, 3)
1	-1	-1	-1	0,38	0,6	3	730	741	732	2,5	2,6	2,3
2	+1	-1	-1	0,42	0,6	3	621	630	633	3,2	3,3	3,4
3	-1	+1	-1	0,38	1,1	3	592	588	590	1,5	1,7	2,0
4	-1	-1	+1	0,38	0,6	5	640	635	648	2,3	1,9	2,2
5	-1	0,19	0,19	0,38	0,8975	4,19	551	565	542	2,7	2,5	2,2
6	0,19	-1	0,19	0,4038	0,6	4,19	590	598	599	1,6	1,5	1,5
7	0,19	0,19	-1	0,4038	0,8975	3	521	543	532	1,7	2,2	2,2
8	-0,29	+1	+1	0,3942	1,1	5	452	443	449	1,4	1,7	1,5
9	+1	-0,29	+1	0,42	0,7775	5	411	422	421	1,6	1,3	1,7
10	+1	+1	-0,29	0,42	1,1	3,71	530	542	530	2,7	2,5	3,0

Таблица 5 - Факторы и интервалы их варьирования

Фактор	Наименование фактора	Уровни факторов			Интервал варьирования
		Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	
X ₁	В/Т	0,38	0,4	0,42	0,02
X ₂	Хемикс Art-2, % от Ц	0,6	0,85	1,1	0,25
X ₃	Время перемешивания t, мин	3	4	5	1

В результате расчёта в программном комплексе «PlanExp B-D13» получены зависимости уравнений регрессии в кодированном виде для средней плотности и прочности при сжатии в 28 суток. Алгоритм программы включает основные процедуры – процедуру расчёта коэффициентов функции отклика и процедуру статистической обработки уравнений регрессии. Все основные вычисления производятся циклично, что позволяет моментально перестраивать математическую модель, изменяя входные данные.

Зависимость от переменных факторов (X_1, X_2, X_3) для средней плотности неавтоклавного пенобетона:

$$Y_1(\rho_{cp}) = 506,296 - 42,986 \cdot X_1 - 53,055 \cdot X_2 - 58,195 \cdot X_3 + 25,074 \cdot X_1^2 + 59,375 \cdot X_2^2 - 20,493 \cdot X_3^2 + 20,535 \cdot X_1 \cdot X_2 - 10,174 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,251 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

Зависимость от переменных факторов (X_1, X_2, X_3) для прочности при сжатии неавтоклавного пенобетона в 28 суток:

$$Y_2(R_{сж.28}) = 1,761 - 0,235 \cdot X_1 + 0,291 \cdot X_2 - 0,358 \cdot X_3 + 0,517 \cdot X_1^2 + 0,139 \cdot X_2^2 - 0,162 \cdot X_3^2 + 0,099 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,032 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,224 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (2)$$

Поскольку для графической интерпретации функции трёх переменных требуется четырёхмерное пространство, с целью визуального упрощения и удобства работы с уравнениями регрессии функцию трёх переменных необходимо преобразовать в функцию двух переменных, поочерёдно принимая константой один из факторов. На основании полученных уравнений регрессии для средней плотности и прочности при сжатии в 28 суток построены графические интерпретации поверхностей откликов в программном комплексе «Mathcad» (рисунки 9-11). Для построения поверхности каждый из факторов фиксировался на нулевом уровне. Для определения приемлемых значений варьируемых факторов выполнен поиск компромиссных значений с помощью анализа сечений поверхностей откликов.

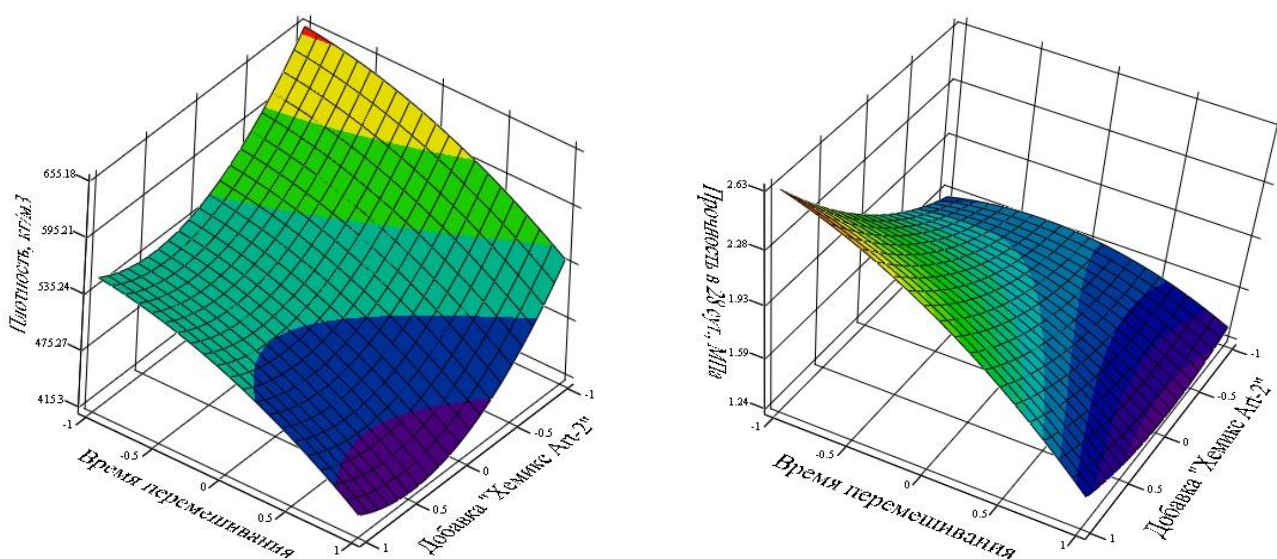


Рисунок 9 - Поверхности отклика при нулевом уровне В/Т для ρ_0 и $R_{сж.28}$

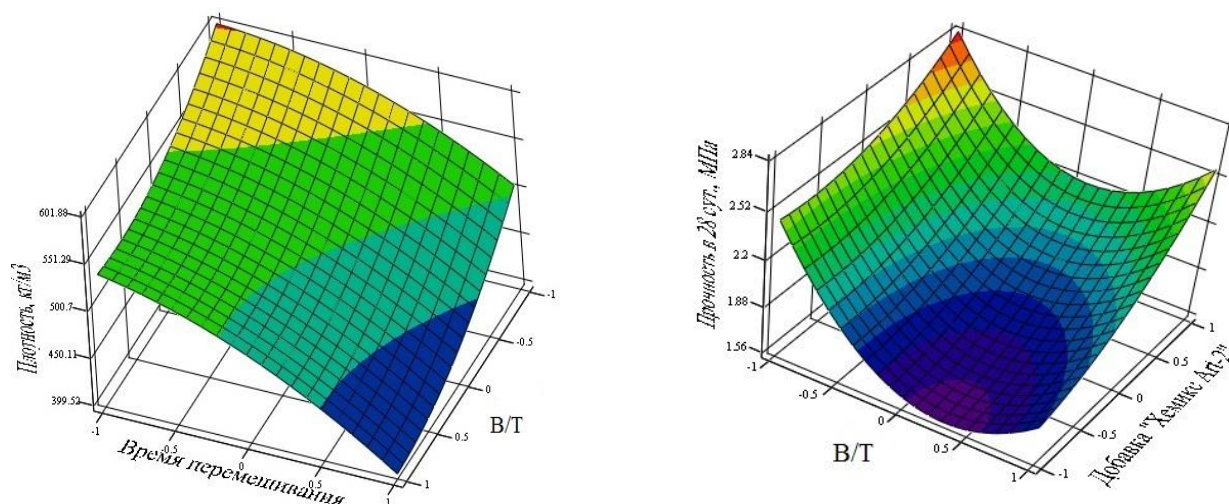


Рисунок 10 - Поверхности отклика при нулевом уровне количества введенной добавки «Хемикс Art-2» для ρ_0 и $R_{сж,28}$

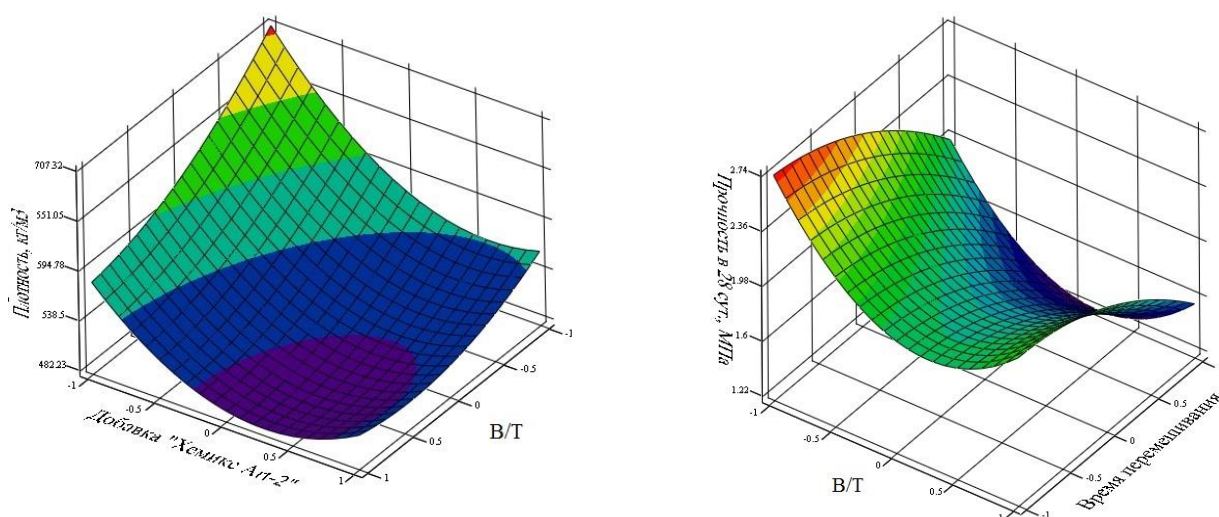


Рисунок 11 - Поверхности отклика при нулевом уровне времени перемешивания пенобетонной смеси для ρ_0 и $R_{сж,28}$

Анализ уравнения регрессии средней плотности неавтоклавного пенобетона показывает, что при положительном сочетании факторов В/Т и добавки «Хемикс Art-2» (X_1 и X_2) следует, что повышение В/Т с одновременным увеличением вводимой химической добавки приводит к увеличению плотности пенобетонной смеси. На основании уравнения регрессии для прочности пенобетона в 28 суток наибольшее влияние оказывает величина В/Т (X_1) и ее отдельные сочетания с факторами «Хемикс Art-2», а также «Время перемешивания пенобетонной смеси» (X_2 и X_3), о чём свидетельствуют положительные знаки при соответствующих коэффициентах.

Для пенобетона плотностью D600 применение золы-уноса способствовало дальнейшему снижению В/Т до 0,35. Соотношение между цементом и золой-уносом, равное 1:1, принято из соображений достаточно высокой активности этой композиции, а также того, что примерно в таком же соотношении применяются кремнезёмистые компоненты в пенобетонах, например, на Лутугинском заводе

«ЛИТОС» и ООО «Домостроительный комбинат» (г. Луганск, ЛНР). Представляет интерес исследования продуктов гидратации пенобетона из смесей с низким В/Т плотностью D600 как наиболее распространённого в Донбасском регионе. Результаты РФА представлены в 28 и 56 суток нормального твердения, а также после тепловлажностной обработки.

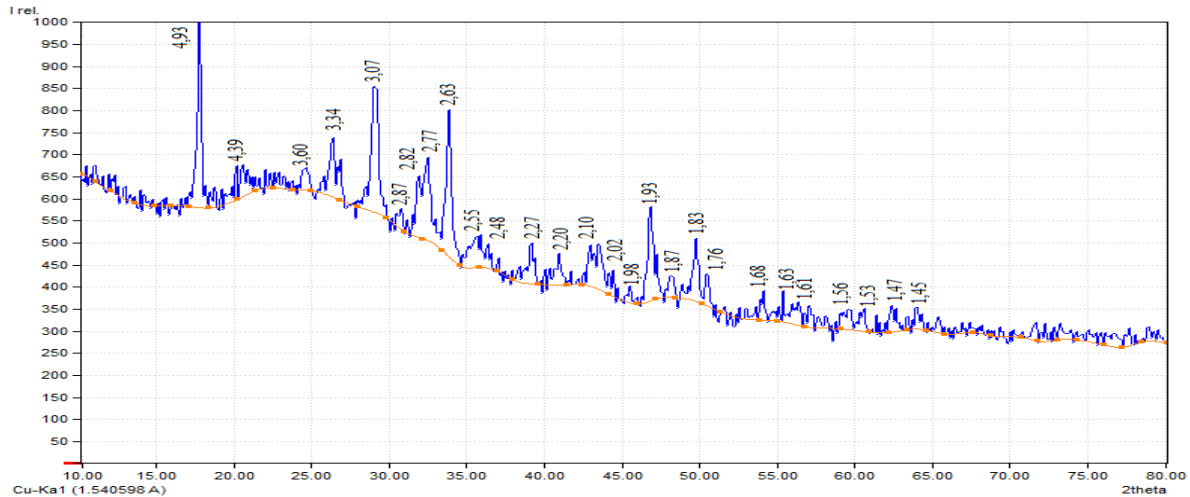


Рисунок 12 - Пенобетон из смеси с В/Т=0,35 в возрасте 28 суток нормального твердения

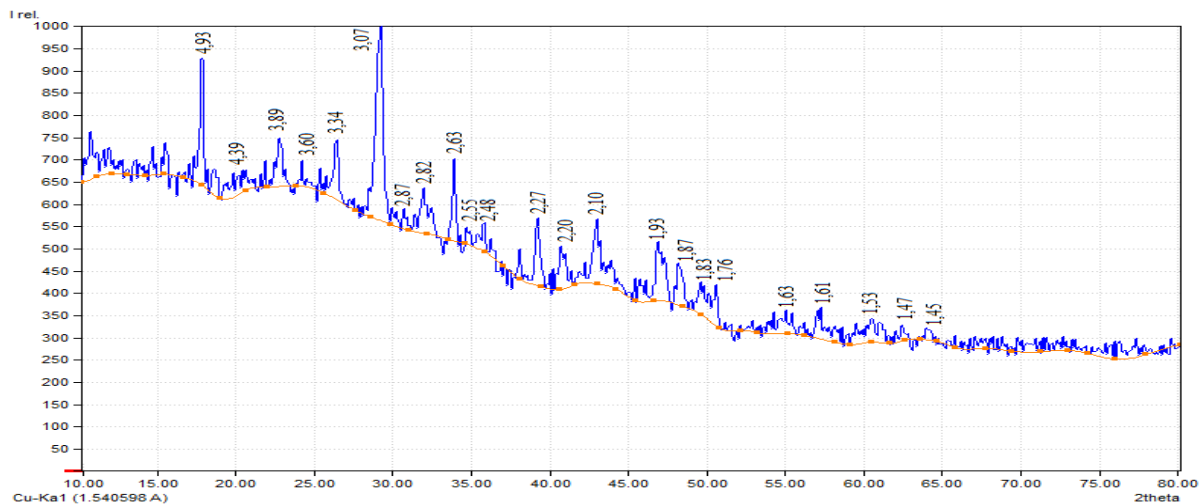


Рисунок 13 - Пенобетон из смеси с В/Т=0,35 в возрасте 56 суток нормального твердения

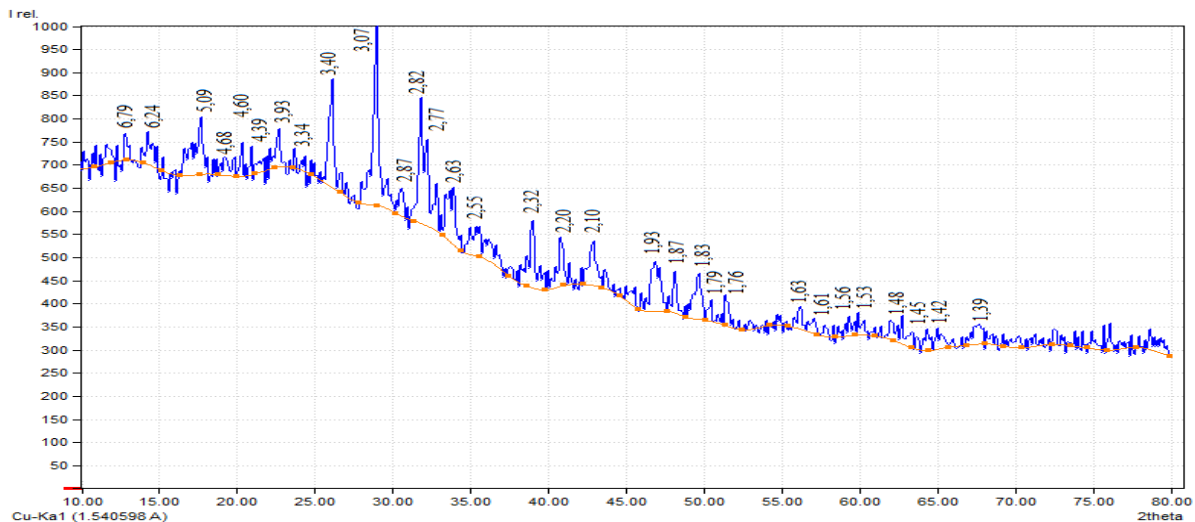


Рисунок 14 - Пенобетон из смеси с В/Т=0,35 после ТВО

Анализ рентгенограмм пенобетона в возрасте 28 суток нормального твердения (рисунок 12) показывает, что интенсивность дифракционных рефлексов, присущих портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с $d = (4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,45; 1,31) \text{ \AA}$, уменьшается относительно состава №1, что является следствием его связывания в мелкозернистые кристаллы гидросиликатов кальция, прорастающих в массе кремнезёмистого компонента, и дополнительно уплотняет, а значит и упрочняет структуру пенобетонного композита.

К 56 суткам нормального твердения (рисунок 13), происходит дальнейшее протекание реакций гидратации цемента и связывание $\text{Ca}(\text{OH})_2$, увеличиваются рефлексы гидросиликата кальция $\text{CSH}(\text{II})$ с $d=(3,07; 2,10) \text{ \AA}$, наблюдается дальнейшее уменьшение рефлексов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с $d=(4,93; 2,63; 1,93; 1,45; 1,31) \text{ \AA}$.

После тепловлажностной обработки пенобетона из смеси с низким В/Т на рентгенограмме (рисунок 14) отсутствуют рефлексы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с $d=(4,93; 3,11) \text{ \AA}$ и CaCO_3 с $d=(2,49; 2,27) \text{ \AA}$, а рефлексы, принадлежащие гидросиликатам кальция $\text{CSH}(\text{II})$ с $d=(3,07; 2,10) \text{ \AA}$, меньше чем в 56 сут., но больше чем 28 сут. нормального твердения.

В таблице 6 приведены составы неавтоклавных пенобетонов из смесей с низким В/Т, а в таблице 7 их эксплуатационные свойства.

Таблица 6 - Составы неавтоклавных пенобетонов на 1 м^3

№п/п	Характеристика состава	В/Т	Ц, кг	ЗУ, кг	Хемикс Art-2, кг	СН, кг	ПО, кг
1	Контрольный, 100%Ц (D600)	0,42	522	-	-	-	1,0
2	50%Ц+50%ЗУ+1,1% Хемикс Art-2+1%СН (D600)	0,35	261	261	2,87	2,61	1,0
3	67%Ц+33%ЗУ+1,1% Хемикс Art-2+1%СН (D500)	0,40	300	150	3,3	3,0	1,2
4	86%Ц+14%ЗУ+1,1% Хемикс Art-2+1%СН (D400)	0,48	310	50	3,41	3,10	1,3

Таблица 7- Эксплуатационные свойства неавтоклавных пенобетонов с низким В/Т

Эксплуатационные свойства	Составы по табл. 7.			
	1	2	3	4
Фактическая плотность, кг/м^3	625	590	515	405
Марка по плотности	D600	D600	D500	D400
Предел прочности при сжатии в 28 сут. нормального твердения, МПа	3,30	2,00	1,10	0,65
Предел прочности при сжатии в 56 сут. нормального твердения, МПа	3,70	2,34	1,50	0,91
Предел прочности при сжатии после ТВО, МПа	2,70	1,70	0,86	0,54
Класс по прочности при сжатии	B2,5	B1,5	B0,75	B0,5
Усадка, мм/м	1,67	0,82	1,4	2,4
Морозостойкость, марка	F35	F35	F25	F25
Теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	0,135	0,133	0,115	0,093

В пятом разделе разработан технологический регламент изготовления пенобетонов неавтоклавного твердения из смесей с низким В/Т. Подсчитана экономи-

ческая эффективность производства неавтоклавных пенобетонов по одностадийной технологии с низким В/Т марки по плотности D600. Общий годовой экономический эффект при выходе предприятия на проектную мощность 5000 м³/год составит 1348903 руб. Экономический эффект на 1 м³ готовой продукции составляет 269,7 руб.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически и экспериментально доказано, что в результате снижения В/Т и модифицирующего влияния комплексной химической добавки «Хемикс Art-2» и Na₂SO₄ на морфологию новообразований и структуру пор цементного поризованного камня можно получить неавтоклавные пенобетоны с повышенными техническими показателями.

2. Установлено, что при использовании белкового пенообразователя «Эталон» и водоредуцирующей добавки «BASF Master Glenium 115» протекают процессы донорно-акцепторных взаимодействий на границе раздела фаз с образованием двойных электрических слоёв, что ведёт к резкому пеногашению, которое заключается в отталкивании гидрофильных радикалов двух типов ПАВ и гидрофобного взаимодействия углеводородных радикалов, что определяет несовместимость указанных ПАВ.

3. Показано, что наиболее эффективной и совместимой с цементом для пенобетонов неавтоклавного твердения при использовании белкового пенообразователя «Эталон» в плане водоредуцирования является добавка «Хемикс Art-2» в количестве 0,85-1,1 % от массы цемента. При В/Т равном 0,42 текучесть пенобетонной смеси увеличена на 32 %, при В/Т равном 0,4 – на 52 %, при В/Т 0,38 – на 89 %, соответственно.

4. При проведении анализа поверхностей откликов и их сечений установлено, что минимальная средняя плотность неавтоклавного пенобетона достигается при: В/Т=0,42; количестве введённой водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» - 0,9 % от массы цемента; времени перемешивания пенобетонной смеси – 4,5-5 мин. Максимальная прочность неавтоклавного пенобетона достигается при: В/Т=0,38; количестве введённой водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» - 1,1 % от массы цемента; времени перемешивания пенобетонной смеси – 5 мин.

5. По результатам рентгенофазового анализа неавтоклавного пенобетона установлено, что к 56 суткам нормального твердения, происходит дальнейшее протекание реакций гидратации цемента и связывание Ca(OH)₂, увеличиваются рефлексы тоберморитоподобных гидросиликатов кальция CSH (II) с d=(3,07; 2,10) Å, которые участвуют в процессе упрочнения, заключающемся в омоноличивании матрицы пенобетона, формировании глянцевого припорового слоя, залечивании дефектов межпоровых перегородок, что, в свою очередь, приводит к существенному повышению эксплуатационных характеристик материала.

6. Разработанные составы неавтоклавного пенобетона из смесей с низким В/Т позволяют получить теплоизоляционные и конструкционно-теплоизоляционные изделия марки по плотности от D400 до D600, классами по прочности B0,5-B1,5,

значениями коэффициента теплопроводности 0,093-0,133 Вт/(м·°С) и усадкой 2,4-0,82 мм/м, соответственно.

7. Разработан технологический регламент изготовления пенобетонов неавтоклавного твердения из смесей с низким В/Т. Выполнено опытно-промышленное внедрение результатов диссертационной работы на ООО «Домостроительный комбинат» (ЛНР, г. Луганск), а также внедрение в учебный процесс ИСА и ЖКХ ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». При рассмотрении экономической эффективности предлагаемых результатов исследований на предприятии по производству неавтоклавного пенобетона из смесей с низким В/Т мощностью 5000 м³/год общий годовой экономический эффект составит 1348903 руб. Экономический эффект на 1 м³ готовой продукции составит 269,7 руб.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. **Вишторский, Е. М.** О возможностях создания производственной базы для выпуска ячеистых бетонов в Луганской области [текст] / Е. М. Вишторский // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2017. – Вып. – 2(124). – С. 61–65. *(Приведён анализ факторов, влияющих на развитие производства ячеистых бетонов в Луганском регионе).*

2. **Вишторский, Е. М.** Оценка свойств некоторых пенообразователей для пенобетонов неавтоклавного твердения [текст] / Е. М. Вишторский // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2018. – Вып. – 4(132). – С. 121–126. *(Получены показатели кратности и стабильности пен различного происхождения при изменении концентрации пенообразователей).*

3. Ефремов, А. Н. Влияние пластифицирующих добавок различной природы на макроструктуру и прочностные характеристики неавтоклавного пенобетона [текст] / А. Н. Ефремов, А. В. Назарова, **Е. М. Вишторский** // Вестник ЛНУ имени Владимира Даля. – Луганск: 2018. – №8 (14). – С.130-134 *(Экспериментально установлена оптимальная ячеистая структура неавтоклавного пенобетона).*

4. Ефремов, А. Н. Пенобетонные смеси пониженного водосодержания с применением водоредуцирующих добавок [текст] / А. Н. Ефремов, А. В. Назарова, **Е. М. Вишторский**, Д. Г. Малинин // Вестник ДонНАСА. – Макеевка: 2019. – Вып. – 1(135). – С. 100–106. *(Определены зависимости плотности и прочности пенобетонов с применением водоредуцирующих добавок).*

5. **Вишторский, Е. М.** Оптимизация рецептурно-технологических параметров пенобетона нормального твердения с использованием математического трёхфакторного планированного эксперимента [текст] / Е. М. Вишторский, А. В. Назарова, С. В. Сороканич // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – Алчевск: 2019. – № 14 (57). – с. 71-77 *(Приведены результаты оптимизации и уравнений регрессии зависимостей для средней плотности и прочности пенобетона от переменных факторов).*

6. **Вишторский, Е. М.** Влияние водоредуцирующих добавок на свойства цементного теста и цементного камня [текст] / Е. М. Вишторский, А. В. Назарова, С. В. Сороканич, В. А. Веретельников // Вестник ЛНУ имени Владимира Даля. – Луганск: 2019. – №10 (28). – С.52-56 (*Представлены данные по влиянию водоредуцирующих добавок на сроки схватывания цементного теста и прочность цементного камня*).

– публикации по материалам конференций:

7. **Вишторский, Е. М.** Применение добавок-ускорителей в производстве неавтоклавных газобетонов золоцементной композиции [текст] / Е. М. Вишторский, П. Е. Крыця // Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы современной науки» (межотраслевая): тезисы доклада, г. Луганск: - 2017. – С. 578-580 (*Показана эффективность применения ускорителей схватывания в ячеистых бетонах*).

8. **Вишторский, Е. М.** Исследование влияния водоредуцирующих добавок в производстве пенобетонов неавтоклавногo твердения [текст] / Е. М. Вишторский, А. Н. Ефремов // Научные чтения памяти доцента кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Александра Дмитриевича Лазько: Сборник тезисов докладов международной конференции, 27 декабря 2018 г.: тезисы доклада, г. Макеевка: - 2018. – С. 8 (*Отмечены особенности применения российских водоредуцирующих добавок для производства пенобетонов «Хемикс Art-2» и «Форт УП-2»*).

9. **Вишторский, Е. М.** Пенообразователи различной химической природы и их влияние на прочностные показатели неавтоклавных пенобетонов [текст] / Е. М. Вишторский, А. Н. Ефремов, А. В. Назарова // Сборник тезисов докладов по материалам международной научно-практической конференции студентов, магистрантов и молодых учёных с международным участием «Актуальные проблемы урбанизированных территорий Донбасса», 6 декабря 2018г.: тезисы доклада, г. Луганск: - 2018. – С. 243-250 (*Отмечены особенности использования пенообразователей различной химической природы*).

10. **Вишторский, Е. М.** Оптимизация рецептурно-технологических параметров пенобетона нормального твердения [текст] / Е. М. Вишторский // Сборник тезисов докладов по материалам конференции «Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли» 19 апреля 2019 года: тезисы доклада, г. Макеевка: - 2019. – С. 32-33 (*Приведены данные о математическом 3-х факторном планированном эксперименте*).

11. **Вишторский, Е. М.** Применение отходов энергетической промышленности в городском строительстве [текст] / Е. М. Вишторский // Актуальные проблемы развития городов: Электронный сборник статей по материалам открытой IV международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Макеевка: 2020. – С. 24–27. (*Показана целесообразность использования золы-уноса в ячеистых бетонах*).

12. **Вишторский, Е. М.** Использование золы-уноса при производстве неавтоклавных пенобетонов нормального твердения [текст] / Е. М. Вишторский, А. В. Назарова, А. В. Непогодин // Материаловедение XXI века. Материалы III между-

народной студенческой научно-практической конференции 4 марта 2020 г.: тезисы доклада, г. Луганск: - 2020. – С. 50-51 (*Определено оптимальное количество кремнезёмистого компонента в пенобетонах*).

– публикации в других изданиях:

13. **Вишторский, Е. М.** Применение топливных зол и шлаков в производстве неавтоклавных газобетонов [текст] / Е. М. Вишторский, И. М. Нескоромный // Вестник ЛНУ имени Владимира Даля. – Луганск: 2017. – №3 (5) Ч.2. – С.127-129. (*Приведены существующие направления использования зол и шлаков ТЭС в производстве ячеистых бетонов*).

14. **Вишторский, Е. М.** Проблемы совместимости поверхностно-активных веществ разнонаправленного действия при производстве неавтоклавных пенобетонов [текст] / Е. М. Вишторский, А. В. Назарова // Научный вестник ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет». – Луганск: 2019. – № 6 (1). – С. 239-245. (*Приведён механизм действия разнонаправленных поверхностно-активных веществ в пеносистемах*).

АННОТАЦИЯ

Вишторский Евгений Михайлович. Пенобетоны неавтоклавного твердения из смесей с низким водотвердым отношением. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, 2021 г.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных неавтоклавных пенобетонов, модифицированных комплексной добавкой «водоредуцирующая добавка + сульфат натрия» (Хемикс Art-2 + Na₂SO₄), характеризующихся с нормируемыми показателями качества на основе снижения водопотребности пенобетонной смеси.

Выполнены экспериментальные исследования по определению соотношения пенообразователя и химических добавок, определена оптимальная ячеистая структура, проведён математический трёхфакторный планированный эксперимент. Исследованы закономерности влияния кремнезёмистого компонента и комплексной добавки (Хемикс Art-2 + Na₂SO₄) на процессы формирования продуктов гидратации вяжущего и структурообразования композитов на основе портландцемента в нормальных условиях и при тепловлажностной обработке. Установлено, что пенобетон из смесей низкой водопотребности имеет сложную минеральную структуру из-за большего вовлечения в формирование связей химического потенциала цемента, кремнезёмистого компонента и химических добавок. Достаточная прочность и низкая усадка обеспечиваются за счёт формирования тоберморитоподобных низкоосновных гидросиликатов кальция и расширяющего действия этtringита.

Получены теплоизоляционные и конструкционно-теплоизоляционные изделия марок по плотности от D400 до D600, классами по прочности B0,5-B1,5, зна-

чениями коэффициента теплопроводности 0,093-0,133 Вт/(м·°C) и усадкой 2,4-0,82 мм/м, соответственно.

Разработан технологический регламент изготовления пенобетонов неавтоклавного твердения из смесей с низким водотвердым отношением. При рассмотрении экономической эффективности предлагаемых результатов исследований на предприятии по производству неавтоклавного пенобетона мощностью 5000 м³/год общий годовой экономический эффект составит 1348903 руб. Экономический эффект на 1 м³ готовой продукции составляет 269,7 руб.

Ключевые слова: пенобетон, водотвердое отношение, водоредуцирующая добавка, кремнезёмистый компонент, плотность, прочность.

ABSTRACT

Vishtorsky Evgeny Mikhailovich. Non-autoclaved foam concrete from mixtures with low water-solid ratio. - Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.23.05 - building materials and products. - Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2021.

The thesis is devoted to the theoretical and experimental study of heat-insulating and heat-insulating-structural non-autoclaved foam concrete modified with a complex additive "water-reducing admixture + sodium sulfate" (Chemix Art-2 + Na₂SO₄) characterized with standardized quality indicators based on reducing the water demand of the foam concrete mixture.

The optimal cellular structure was determined, and a mathematical three-factor planned experiment was carried out. The regularities of the influence of the silica component and complex additive (Chemix Art-2 + Na₂SO₄) on the processes of formation of binder hydration products and structure formation of composites based on Portland cement under normal conditions and during heat and moisture treatment. It was found that foam concrete from mixtures of low water demand has a complex mineral structure due to the greater involvement of the chemical potential of cement, silica component and chemical admixtures in the formation of chemical bonds. Sufficient strength and low shrinkage is ensured by the formation of the tobermorite group calcium silicate hydrates and the expanding action of ettringite.

Heat-insulating and structural-heat-insulating products of grades were obtained in terms of density from D400 to D600, strength classes B0.5-B1.5, values of thermal conductivity coefficient 0.093-0.133 W/(m °C) and drying shrinkage 2.4-0.82 mm/m.

A technological procedure for the production of non-autoclaved foam concrete from mixtures with a low water-solid ratio has been developed. When considering the economic efficiency of the proposed research results at an enterprise for the production of non-autoclaved foam concrete with a capacity of 5000 m³/year, the total annual economic effect will be 1348903 RUB. The economic effect per 1 m³ of finished products will be 269.7 RUB.

Keywords: foam concrete, water-solid ratio, water-reducing admixture, silica component, density, strength.