

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Суворов Иван Олегович

**ДИСПЕРСНОЕ ПОЛИАРМИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ УСАДКИ
ФИБРОПЕНОБЕТОНА**

Специальность: 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, Ю. В. Пухаренко

Санкт-Петербург – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСАДКЕ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ И ЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБАХ ЕЕ СНИЖЕНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	10
1.1 Краткая историческая справка о развитии технологии ячеистых бетонов	10
1.2 Современное состояние проблемы. Усадка ячеистых бетонов и факторы ее определяющие.....	13
1.3 Меры снижения усадочных напряжений и деформаций	17
1.4 Эффективность применения армирующих волокон для снижения усадки ячеистого бетона	37
Выводы по первой главе	42
2. ВЫБОР ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	44
2.1 Применяемые материалы.....	44
2.2 Лабораторное оборудование.....	47
2.3 Методика изготовления образцов. Определение усадки при высыхании.	50
Выводы по второй главе	52
3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ НА УСАДКУ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА	53
3.1 Определение оптимального состава исходного бетона с возможно минимальной величиной усадки	53
3.2 Теоретические принципы снижения величины усадки ячеистого бетона путем армирования волокнами	57
3.3 Исследование влияния и оптимизация параметров армирования, обеспечивающих повышение прочности, трещиностойкости ячеистого бетона и снижение усадки	61
3.3.1 Влияние различного содержания армирующих волокон на усадочные деформации фибропенобетона.....	61

3.3.2 Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавного твердения. Сравнение значений теоретической и фактической усадки	68
3.3.3 Постановка полного факторного эксперимента	71
Выводы по третьей главе	75
ГЛАВА 4 ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА С ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКОЙ	77
4.1 Технология производства неавтоклавного фибропенобетона	78
4.2 Экономическая оценка производства пазогребневых плит	85
4.3 Пазогребневые плиты фибропенобетонные в сравнении с другими изделиями для устройства внутренних межкомнатных и межквартирных перегородок	87
Выводы по четвертой главе	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
ПРИЛОЖЕНИЯ	109

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Решение проблемы снижения стоимости зданий и сооружений требует увеличения производства многофункциональных энергоэффективных и недорогих строительных материалов, к числу которых относятся ячеистые бетоны, обеспечивающие реализацию программы бюджетного жилищного строительства во многих регионах России с разными климатическими условиями. Одной из разновидностей ячеистых бетонов является неавтоклавный фибропенобетон, обладающий по сравнению с аналогами повышенной прочностью и ударостойкостью, низкой теплопроводностью и высокой способностью к поглощению звука. Наряду с указанными достоинствами, фибропенобетон имеет ряд недостатков, основным из которых остается высокая усадка, приводящая к трещинообразованию и даже разрушению материала. Опыт практического использования фибропенобетона показывает, что его армирование только низко модульными, например, полипропиленовыми волокнами, которые применяются традиционно, недостаточно для устранения указанного недостатка, и требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на развитие основ дисперсного полиармирования, способствующего снижению усадки и получению эффективного материала.

Степень разработанности темы исследования. Результаты исследований в области ячеистых бетонов и дисперсного армирования, ставшие теоретической основой диссертационной работы, получены в разное время В.П. Вылегжаниным, В.Т. Ерофеевым, А.С. Коломацким, В.В. Лесновым, Л.В. Моргун, В.И. Морозовым, В.А. Пинскером, Ю.В. Пухаренко, Е.С. Силаенковым, В.Я. Соловьевой, В.В. Строковой, А.М. Сычевой, Ю.М. Тихоновым, Т.А. Уховой, А.М. Харитоновым, Т.А. Хежевым, В.Д. Черкасовым, Л.Д. Шаховой и др. учеными. Изучению причин и механизма усадки бетонов посвящено значительное количество работ Ю.М. Баженова, М.И. Бруссера, Л.И. Дворкина, О.Л. Дворкина, Р. Лермита, З.Н. Цилосани, Ю.В. Чеховского, А.Е. Шейкина.

Цель исследования – теоретическое обоснование и разработка вариантов дисперсного полиармирования фибропенобетона для снижения усадочных деформаций.

Задачи исследования:

1. Изучение влияния дисперсного армирования на усадочные деформации и прочностные характеристики пенобетона неавтоклавного твердения.

2. Исследование зависимости и степени изменения усадки полиармированного фибропенобетона от вида, свойств волокон и параметров фибрового армирования.

3. Определение комбинаций армирующих волокон, обеспечивающих снижение усадочных деформаций, повышение прочности и трещиностойкости фибропенобетона.

4. Разработка эффективного состава ячеистого фибробетона, армированного одновременно несколькими видами волокон.

5. Выпуск опытно-промышленной партии фибропенобетонных изделий на действующей технологической линии, проведение натурных испытаний и сравнение полученных данных с результатами лабораторных исследований.

6. Разработка нормативно-технических документов и внедрение разработанных составов неавтоклавного полиармированного фибропенобетона в производство с обеспечением технико-экономического эффекта.

Объект исследования – конструкционный фибропенобетон неавтоклавного твердения.

Предмет исследования – прочностные и деформационные характеристики (усадка) фибропенобетона.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Установлена эффективность снижения усадки ячеистого бетона путем дисперсного армирования одновременно несколькими видами волокон с различными размерами и деформационными характеристиками, оптимально

соответствующими состоянию и параметрам структуры композита на каждом масштабном уровне.

2. Предложена математическая модель зависимости усадки ячеистого бетона от деформационных свойств волокон и степени дисперсности армирования. Показано, что степень снижения усадки увеличивается с повышением модуля упругости волокон, уменьшением их длины и диаметра, что необходимо учитывать при составлении комбинаций при дисперсном полиармировании.

3. В рамках принятой технологии экспериментально установлена возможность снижения усадки ячеистого бетона при использовании комбинации высоко- и низко модульных волокон: на 17 % по сравнению с моноармированными образцами; на 36 % по сравнению с пенобетоном без фибрового армирования. При этом эффективность дисперсного полиармирования определяется пределом насыщения бетона волокнами, входящими в состав комбинации, зависит от их свойств и соотношения между ними.

4. Разработан новый материал, включающий высоко- и низко модульные армирующие волокна при оптимальном их соотношении, обеспечивающем повышение прочности при малом расходе цемента (заявка на патент № 2015103136 от 30.01.2015 г.).

Теоретическая значимость работы заключается в разработке модели, отражающей взаимосвязь усадочных деформаций фибропенобетона с параметрами фибрового армирования, позволяющей прогнозировать величину усадки и оценивать эффективность тех или иных комбинаций волокон при дисперсном полиармировании.

Практическая ценность и реализация результатов исследований.

1. Разработаны технические условия «Изделия стеновые фибропенобетонные. ТУ 5746-003-73112066-2015» и технологический регламент на производство пазогребневых плит для перегородок из неавтоклавного фибропенобетона.

2. Проведены натурные испытания фибропенобетонных перегородок, свидетельствующие об эффективности дисперсного армирования одновременно несколькими видами волокон для снижения усадки и исключения появления усадочных трещин в изделиях.

3. Организовано опытно-промышленное производство фибропенобетонных плит перегородок на базе технологической линии «Декор-Строй» (г. Старая Русса). Экономический эффект достигается снижением стоимости сырьевой смеси в среднем на 14 %.

Методологической основой диссертационного исследования послужили основные положения теории композиционных материалов и строительного материаловедения в области ячеистых бетонов. В настоящей работе использовались стандартные методы испытаний и исследований сырьевых материалов и бетонов на их основе.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты теоретических и экспериментальных исследований усадки и прочности фибропенобетона при дисперсном полиармировании, используемые для определения эффективных комбинаций фибр в составе сырьевых смесей;

– математическая модель зависимости усадки фибропенобетона от деформационных свойств волокон и степени дисперсности армирования;

– составы ячеистого бетона, армированного одновременно несколькими видами волокон, обеспечивающих снижение усадки и исключающих появление усадочных трещин;

– результаты опытно-промышленного внедрения разработанных составов фибропенобетона с технико-экономической оценкой.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.05 – Строительные материалы и изделия, а именно: п. 1 «Разработка теоретических основ получения различных строительных материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств», п. 6 «Создание теоретических основ получения строительных композитов гидратационного твердения и композиционных вяжущих веществ и бетонов».

Степень достоверности и апробация работы. Результаты диссертационной работы сравнивались с данными промышленных испытаний и научных работ специалистов в области пенобетонов неавтоклавного твердения. Обработка результатов экспериментов и оптимизация составов фибропенобетона проводилась с использованием статистических методов, аппроксимации и методом полного факторного эксперимента.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на: 64-й международной научно-технической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ, 2011); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы строительства и архитектуры» (СПбГАСУ, 2012); Международной заочной научно-практической конференции «Образование и наука: современное состояние и перспективы развития» (г. Тамбов, 2013 г.); II и III Международном конгрессе молодых ученых «Актуальные проблемы строительства» (СПбГАСУ, 2013 и 2014 г.г.).

На основе рекомендаций, сформулированных с учетом результатов диссертационных исследований, организовано опытно-промышленное производство пазогребневых плит перегородок из неавтоклавного фибропенобетона на заводе ООО «Декор-Строй» (г. Старая Русса), что подтверждено актами внедрения.

Работа выполнена при поддержке грантов Правительства Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2011, 2013 г.г. Дипломы победителя конкурса грантов Санкт-Петербурга представлены в приложении 1.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 11 печатных работах, общим объемом 3 п.л., лично автором – 1,42 п.л., в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ, заявка на патент № 2015103136 от 30.01.2015 г..

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложений. Диссертация содержит 137 страниц машинописного текста, 20 таблиц, 51 рисунок, 14 формул, 11 приложений и список использованной литературы из 120 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСАДКЕ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ И ЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБАХ ЕЕ СНИЖЕНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Краткая историческая справка о развитии технологии ячеистых бетонов

Со второй половины 1990 годов в России началось восстановление производства и применения неавтоклавного пенобетона в строительстве. Научные коллективы и отдельные ученые, производители и различные организации начали активные разработки и внедрение неавтоклавной технологии производства. В работах многих авторов доказывается целесообразность и выгода применения пенобетона как теплоизоляционного или теплоизоляционно-конструкционного стенового и конструкционного материала в строительстве энергоэффективного жилья.

В первой половине 2000-х годов множество работ было направлено на совершенствование технологии неавтоклавного пенобетона. В рамках научных конференций велись дискуссии, в которых рассказывалось как о недостатках пенобетона, так и о его уникальных характеристиках. В то же время производители совместно с научными коллективами вели работы для получения качественного продукта из пенобетона.

Основные задачи, поставленные научно-техническим советом Госстроя России 27 ноября 2003 г., заключаются в необходимости исследований по повышению прочности, снижению усадки и ускорению твердения изделий; разработки и внедрения ячеистых бетонов, дисперсно-армированных неметаллическими волокнами; создания небольших заводов по производству изделий из неавтоклавного ячеистого бетона [63].

После 2008 года газобетон все активнее стал вытеснять неавтоклавный пенобетон. Новые производства автоклавного газобетона развернуты в Санкт-

Петербурге и области, в Москве. Однако изделия из неавтоклавного пенобетона могут составить конкуренцию в определенных областях строительства, за счет своей гибкой и экономичной технологии производства. При постоянном контроле качества, применении научных разработок возможно получение строительного материала с высокими эксплуатационными характеристиками.

По мнению авторов [63], модернизация производства и широкое применение ячеистых бетонов приведет к уменьшению стоимости строительства, показателей трудоемкости и энергозатратности, при этом долговечность, качество и экологичность домов вырастет в разнообразных природно-климатических условиях страны.

В работе И.Б. Удачкина [94] рассматриваются основные проблемы развития производства пенобетона. Указаны недостатки пенобетона, по сравнению с газобетоном, к которым относятся меньшая прочность и высокая влажностная усадка. К достоинствам технологии производства пенобетона можно отнести низкую капиталоемкость и трудоемкость, невысокие расходы энергоносителей. Благодаря этому, появляется возможность организации небольших производств изделий по неавтоклавной технологии, что ведет к снижению транспортных расходов и активизации жилищного строительства. В России различная номенклатура продукции позволяет возводить дома из пенобетона отечественных производителей [102].

Необходимость экономии энергоресурсов отмечена в работе [103]. Технология автоклавного газобетона отличается огромным расходом энергии. Неавтоклавные технологии более демократичны и менее энергоемкие. Нормативы по теплозащите жилых зданий предусматривают применение строительных материалов, обладающих малой теплопроводностью. К таким материалам относится неавтоклавный пенобетон, за счет которого можно добиться наибольших показателей по тепло- и звукоизоляции при минимальной толщине стен.

По мнению Т.А. Уховой, ячеистые бетоны неавтоклавного твердения достигли качества автоклавного на уровне опытных и отдельных

производственных площадок [100]. Получение высококачественного пенобетона возможно при условии рационального подбора сырьевых компонентов и соотношения между ними, введения волокнистых добавок, механохимической активизации компонентов сырьевой смеси, комплексному применению различных видов добавок, оптимизации технологических параметров. Производство пенобетона возможно не только в индивидуальных формах, но и по резательной технологии. Получен неавтоклавный пенобетон со значениями средней плотности 600 кг/м^3 и прочности при сжатии 3,2 МПа, усадка при высыхании составила 1,8 мм/м.

Теплоизоляционные свойства пенобетона позволяют существенно сократить толщину ограждающей конструкции. В малоэтажном строительстве возможно применение ячеистых бетонов для всех конструкций: наружных и внутренних стен, перегородок, перекрытий и перемычек. Высокая огнестойкость ячеистого бетона важна при возведении противопожарных стен в зданиях.

Испытаниями теплоизоляции морозильных камер, эксплуатировавшихся более 70 лет, доказаны долговечность ячеистых бетонов, и повышение прочностных показателей неавтоклавных изделий во времени. Для расширения сферы применения ячеистых бетонов необходимо производить изделия, соответствующие современным требованиям по теплозащите, на автоматизированных линиях. Данные неавтоклавные пенобетоны отличаются сниженными усадочными деформациями при высыхании.

Руководители Центра ячеистых бетонов В.А. Пинскер и В.П. Вылегжанин приводят результаты анализа применения ячеистых бетонов в Ленинграде, начиная с 1924 года [65]. Монолитный пенобетон использовался для утепления крыш промышленных предприятий. С 1949 года на Изоляционно-сварочном заводе была налажена технология изоляции теплофикационных сетей пенобетоном. Разработана серия пенобетонных пятиэтажек. С 1960 года начали вводить в эксплуатацию крупные газобетонные заводы, были разработаны и реализованы проекты цельногазобетонных 5-этажных домов с широкой номенклатурой изделий.

Применение ячеистого бетона в строительстве имеет большой потенциал роста [11, 22]. Для более широкого использования пенобетона, при всех его конкурентных преимуществах, возникает необходимость в снижении усадочных деформаций при условии сохранения высоких эксплуатационных характеристик.

1.2 Современное состояние проблемы. Усадка ячеистых бетонов и факторы ее определяющие

Для снижения стоимости квадратного метра жилья требуется увеличение производства дешевых строительных материалов повышенной долговечности, к которым относятся ячеистые бетоны. По сообщению газеты «Строительный Еженедельник» в 2012 году в Санкт-Петербурге и Ленобласти было произведено 1,1 млн. куб. м газобетона, 85% из которого было реализовано на территории региона, а остальное – на территории Северо-Западного федерального округа. По данным Росстата, опубликованным в журнале Деньги (№ 19 18.05 – 24.05.2015), в первом квартале 2015 года производство «блоков стеновых мелких из ячеистого бетона» выросло на 22,9 %.

Несмотря на появление крупных заводов по производству автоклавного газобетона в регионе, неавтоклавный пенобетон остается весьма привлекательным для производителей и потребителей и может конкурировать с газобетоном по многим параметрам.

Новые исследования в области строительных материалов, в частности ячеистых бетонов, необходимы для совершенствования существующих технологических линий и организации современных производств. Строительные фирмы всегда находятся в процессе поиска альтернативных материалов, применение которых будет экономически выгодно и целесообразно. Изделия из ячеистого бетона идеально подходят для реализации программы бюджетного строительства во многих регионах России с разными климатическими условиями, так как соответствуют требованиям энергоэффективности, низкой себестоимости

и экономии энергоресурсов. Одной из разновидностей ячеистых бетонов является неавтоклавный пенобетон, обладающий низкой теплопроводностью и высокой способностью к поглощению звука. Пенобетон имеет много достоинств, но есть и ряд недостатков многие из которых не устранены полностью в рамках неавтоклавной технологии производства. В качестве основного недостатка необходимо отметить высокие усадочные деформации, приводящие к трещинообразованию и даже разрушению материала.

Усадка ячеистых бетонов и факторы ее определяющие

Усадка характеризуется как уменьшение линейных размеров и объема затвердевшего бетона вследствие потери им влаги, гидратации, карбонизации и других процессов [99]. Усадка цементного камня при твердении составляет 1 ... 2 мм/м [7]. Из-за неравномерности усадочных деформаций возникают внутренние напряжения и микротрещины.

В исследованиях российских и зарубежных ученых отмечены основные виды усадки, из которых складывается сумма деформаций [7, 120]. Это усадка при высыхании (влажностная), контракционная и карбонизационная.

Усадка при высыхании (влажностная) представляет собой объемные изменения в бетоне в связи с сушкой, и это происходит, как только бетон помещается в воздушную среду. Усадка при высыхании неизбежна и ее величина контролируется за счет снижения количества вяжущего вещества в смеси. Усадка при высыхании может продолжаться в течение нескольких лет в зависимости от свойств бетона.

Причиной контракционной усадки является то, что объем новообразований цементного камня меньше его начального объема. Эта усадка развивается в период интенсивного протекания химических реакций между цементом и водой, что приводит к образованию воздушных пор. Как правило, эта усадка развивается в период затвердевания бетона, когда он еще достаточно пластичен, и поэтому не сопровождается заметным трещинообразованием.

Карбонизационная усадка происходит, когда цемент вступает в реакцию с углекислым газом, присутствующим в воздухе. Карбонизационная усадка очень мала и имеет место только в раннем возрасте. Ее можно контролировать путем защиты свежего бетона, так чтобы цемент не реагировал с двуокисью углерода.

Усадочные трещины возникают из-за комбинации этих типов усадки, в раннем возрасте (карбонизационная) и в дальнейшем (контракционная и усадка при высыхании). Усадка больше, когда бетон высыхает слишком быстро, в связи с условиями окружающей среды. Затвердевший бетон будет меняться в объеме за счет изменения влажности в пределах своей капиллярной системы пор. Движущим источником усадки при высыхании является испарение свободной воды из капиллярной системы пор. Сушка происходит с поверхности, которая подвергается воздействию окружающей среды, и это продолжается, если относительная влажность воздуха меньше, чем влажность воздуха в пределах капиллярных пор.

Основные параметры, влияющие на усадку бетона – это вид заполнителя, содержание цемента, и водоцементное соотношение. Другие параметры, которые могут влиять на усадку, включают в себя вид вяжущих материалов, различных добавок, условия окружающей среды, и условия твердения бетона. Усадку определяют путем фиксирования изменения образца в длине между верхней и нижней частью с помощью специального прибора.

В СССР работы по исследованию усадочных деформаций бетона были опубликованы следующими авторами: С. В. Александровским, К. Г. Красильниковым и Н. Н. Скоблинской, Н. А. Мощанским, М. С. Остриковым, З. Н. Цилосани, А. Е. Шейкиным. Усадку, происходящую в ненагруженном цементном камне при постоянной температуре, все исследователи связывают с испарением из него влаги или изменением форм связи влаги с твердой фазой цементного камня вследствие гидратации зерен цемента [81].

Р. Лермит [43] так же связывает самопроизвольную деформацию бетона с миграцией содержащейся в цементе воды. Испарение, обнаруживающееся суммарно в потере массы, сопровождается и уменьшением объема. Как правило,

усадка в пенобетоне протекает с большей скоростью в связи с его более высокой пористостью. При использовании минеральной муки схожего гранулометрического состава с цементом, количество воды затворения оказывает слабое влияние на усадку цементного камня. Это говорит о том, что укорочение камня определяется утратой цеолитовой воды, количество которой зависит лишь от объема гидратирующего цемента. Усадка неравномерно проходит в направлении от поверхности к внутренним зонам бетона. Она приводит к внутренним напряжениям и остаточным деформациям.

Профессор Дворкин [24] указывает, что усадка характеризует деформации, не связанные с действием внешних нагрузок. Больше всего сказывается на общей усадке и на работе бетона в конструкциях влажностная или гидравлическая усадка, характерная для периода высыхания бетона. Уменьшение объема бетона в процессе его высыхания обусловлено, в первую очередь, испарением свободной воды из бетона. Карбонизационная усадка бетона объясняется уменьшением его объема при взаимодействии свободного гидроксида кальция, содержащегося в бетоне, с углекислым газом воздуха, в результате чего образуется карбонат кальция CaCO_3 . Контракционная усадка возникает при прохождении реакций гидратации в твердеющем цементном тесте, в результате которых общий объем новообразований всегда немного меньше, чем общий объем исходных веществ, вступивших в химическое взаимодействие.

Усадочные деформации вызывают в бетоне внутренние напряжения, особенно значительные при неравномерном высыхании конструкций и работе их в сжатых условиях. Они могут вызывать, особенно в сочетании с температурными напряжениями, появление трещин. Усадочные напряжения неблагоприятно влияют на морозостойкость, водонепроницаемость и долговечность конструкций.

В литературе [115] приводятся факторы, влияющие на усадку пенобетона: химический и минеральный состав, тонкость помола цемента, содержание в нем гипса и щелочей; водоцементное отношение; условия твердения бетона, особенности наполнителей; вид и количество поверхностно-активных добавок, вводимых в цемент или в воду затворения; параметры окружающей среды.

По мнению авторов [113], опасность для пенобетона представляет влажностная и карбонизационная усадки. Пенобетон особенно сильно подвержен усадкам по следующим причинам: его пористость способствует быстрому прониканию воздуха, а вместе с ним и влаги внутрь пенобетона, а поэтому он увлажняется или высыхает намного быстрее, чем обыкновенный бетон на гравии или щебне. Усадка цементного камня возникает в случае образования вогнутого мениска, характерного для системы «вода - гидрофильный цементный камень», под воздействием давления капиллярных сил, стремящихся сблизить стенки пор. Действие капиллярных сил при contractionной усадке цементного камня представлено на рисунке 1 [113].

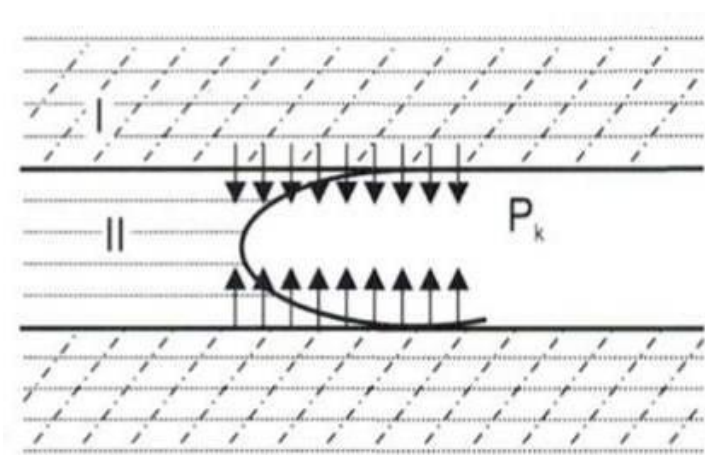


Рисунок 1 – Действие капиллярных сил при contractionной усадке цементного камня (I – цементный камень, II – поровая вода).

Карбонизационная усадка при одновременном высыхании изделий приводит к меньшим деформациям. Для снижения усадочных явлений необходимо выдерживать изделия в теплом помещении, в месте без сквозняков и прямых солнечных лучей.

1.3 Меры снижения усадочных напряжений и деформаций

Основные технологические особенности получения пенобетона заключаются в обеспечении однородной ячеистой структуры и требуемых

прочностных показателей, которые зависят от множества факторов. Необходимо учитывать, что пенобетон неавтоклавного твердения характеризуется высокой усадкой при высыхании, снижающей его трещиностойкость. Улучшение характеристик композита возможно при использовании эффективных пенообразователей, повышении активности вяжущих веществ, применении химических и высокодисперсных минеральных модификаторов. При этом внедрение технологических приемов должно быть экономически обосновано [14].

Вяжущее вещество

В технологии производства неавтоклавного пенобетона вяжущим веществом является портландцемент. Для снижения усадочных явлений в сырьевую смесь вводятся различные наполнители и добавки, позволяющие снизить расход вяжущего.

В литературных источниках [7, 14, 24, 43, 120] отмечается значительное влияние содержания и вида цемента на усадочные деформации. Использование высокоалюминатных цементов ведет к увеличению усадки. При прочих равных условиях конечная усадка цементного камня увеличивается с увеличением содержания двухкальциевого силиката C_2S в цементе. Повышается также усадка цементного камня с увеличением содержания трехкальциевого алюмината C_3A , удельной поверхности цемента. В зависимости от вида цемента усадка цементного камня может изменяться в 2-3 раза. Однако вследствие того, что химико-минеральный состав и дисперсность современных заводских портландцементов изменяются в сравнительно узкой области, влияние особенностей цементов на величину усадки бетона оказывается малосущественным. Лишь при использовании белитовых, высокоалюминатных цементов, изготавливаемых промышленностью в небольших количествах, влияние минерального состава цемента на усадку бетона может стать достаточно весомым.

Увеличение содержания цемента при постоянном водоцементном соотношении будет способствовать усадке при высыхании. Увеличение содержания воды также увеличивает усадку при высыхании, так как количество

испаряемой воды в единице объема увеличивается. Таким образом, снижение водотвердого соотношения, сохраняя при этом малое количество цемента, может помочь снизить усадку.

Существенное влияние на усадку оказывает тип цемента и тонкость помола. Более мелкие частицы цемента реагируют гораздо быстрее с резко проявляющейся гидратацией, и, следовательно, усадка может достигать более высоких значений. Кроме того, мелкие частицы цемента приводят к высоким капиллярным напряжениям, что в свою очередь увеличивает усадку. С другой стороны, более крупные частицы цемента не подвергаются полной гидратации, и реакция протекает гораздо медленнее. Это снижает температуру при гидратации. Не прореагировавшие частицы цемента выступают в качестве заполнителя, что уменьшает усадку.

Современные бетонные смеси, содержащие такие материалы, как зола-уноса, шлаки и микрокремнезем в качестве частичной замены цемента, помогают увеличить экономическую эффективность. Помимо этого, эти материалы имеют воздействие на усадку бетона. Применение золы-уноса позволяет снизить количество цемента в сырьевой смеси, и, как следствие, температуру гидратации.

Для производства пенобетона целесообразно применять цементы с высокой удельной поверхностью. Частицы вяжущего вещества адсорбируются на поверхности ячеек пены и препятствуют стеканию жидкой фазы на границу Плато, а также способствуют высокой скорости схватывания и твердения пенобетона [76]. Авторы [109] предлагают дополнительную активацию цемента с добавкой кварцевого песка для улучшения качества поверхности частиц заполнителя в результате разрушения поверхностных неактивных слоев. Разработаны составы кладочных и штукатурных растворов для пенобетонных изделий с пористым заполнителем из отходов производства теплоизоляционных ячеистых бетонов. Полученные растворы обладают свойствами, близкими к ячеистым бетонам. Кладочный раствор средней плотности 1025 кг/м^3 характеризуется значениями прочности при сжатии $6,58 \text{ МПа}$, при изгибе – $2,81 \text{ МПа}$. Деформации, при изменении влажности от 35 до 5 %, равны $2,15 \text{ мм/м}$.

Влажностная усадка растворов приближена к усадке пенобетонных изделий, что позволяет раствору деформироваться совместно с основанием без образования трещин при воздействии переменных температур.

В институте ВНИИстром им. П.П. Будникова под руководством А. А. Ахундова была разработана технология малоусадочного пенобетона на основе безусадочных и расширяющихся цементов [94]. Данные цементы подробно рассмотрены ниже в обзоре работ В. Н. Моргун.

Наполнители

Результаты исследований по влиянию содержания заполнителей на усадочные деформации в большинстве своем касаются технологии тяжелого бетона. Тип и объем заполнителя в бетонной смеси сильно влияет на усадку. В технологии бетона применяются заполнители, к которым относят кварц, гранит, полевой шпат, известняк, доломит. Увеличение содержания заполнителя ведет к сокращению цементной пасты и, как следствие, к снижению усадочных деформаций. Материалы, такие как микрокремнезем, зола-уноса и шлаки используют в составе вяжущего вещества для сокращения расхода цемента. Однако при использовании данных материалов возникают проблемы, связанные с трещинообразованием, одним из таких факторов которого является усадка [120].

Усадка увеличивается при значительном содержании мелкозернистых заполнителей, а также при наличии примеси глинистых частиц [7, 24]. При использовании песка, содержащего крупные зерна, превышающие в диаметре толщину перегородок в ячеистой структуре, может произойти ее разрушение с увеличением размера ячеек, приводящее к ухудшению прочностных и теплофизических характеристик пенобетона. Кроме того, в большинстве случаев происходит осаждение таких зерен песка с разуплотнением пенобетона по высоте изделия и ухудшением его качества [14].

При рассмотрении формирования структуры пенобетона низкой плотности авторы [101] берут за основу модель Меркина А. П. бронирования единичного воздушного пузырька частицами твердой фазы. Феклистым В. Н. и Абдулиным А. К. предложена наглядная схема единичного пузырька в структуре пенобетона,

в зависимости от соотношения объемных фаз при получении пенобетонной смеси различной плотности. Схемы единичного пузырька в структуре пенобетона, в зависимости от соотношения объемных фаз при получении пенобетонной смеси различной плотности представлены на рисунке 2. Вариант а) иллюстрирует избыток твердой фазы по сравнению с жидкой, часть объема вяжущего и заполнителя оказывается не только в пленках, но и внутри пузырька (плотность пенобетона 800-1200 кг/м³). Вариант б) показывает примерное равенство объема жидкой и твердой фаз, что создает полное бронирование жидких пленок (плотность 600-800 кг/м³). Вариант в) – присутствует избыток жидкой фазы, это значит, что не весь объем жидких пленок бронируется твердыми частичками [101].

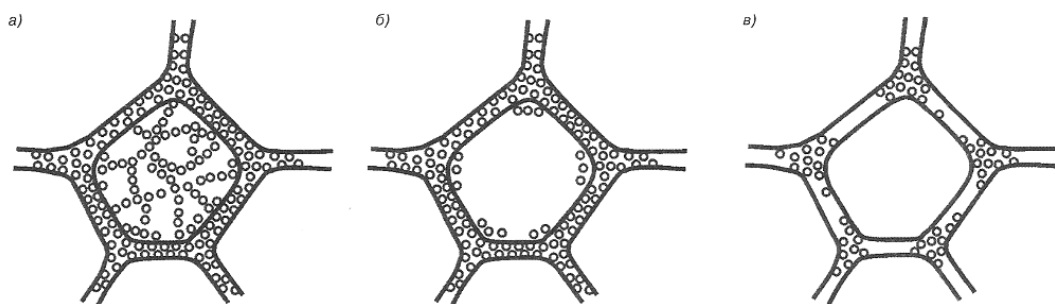


Рисунок 2 - Схемы единичного пузырька в структуре пенобетона, в зависимости от соотношения объемных фаз при получении пенобетонной смеси различной плотности.

Для повышения устойчивости строительной пены рекомендуется использование тонкомолотого заполнителя с удельной поверхностью 120-150 м²/кг [85]. Это могут быть известняки с различным содержанием CaCO₃. При замене песка данными наполнителями наблюдается отсутствие осадки смеси и повышение прочности при сжатии пенобетона. Для повышения реакционной способности цементосодержащей матрицы предлагается использовать золь-добавки ортокремниевой кислоты, берлинской лазури, гидроксида железа. Данные добавки повышают устойчивость пенобетонной массы.

Применение вторичного сырья приводит к снижению экологической нагрузки на окружающую среду. Авторы научной работы [98] отмечают сложную

экологическую обстановку вместе с ростом цен на энергоносители, что стимулирует использование отходов промышленности и побочных продуктов в производстве ячеистых бетонов. Использование золы-уноса ТЭЦ или микрокремнезема в качестве заполнителя при получении пенобетона показало общее увеличение прочностных показателей при сокращении расхода цемента [94].

В работе авторов [42] поднимается проблема ликвидации бетонных отходов после сноса зданий. Наибольшую долю отходов составляет щебень и мелкий песок, который содержит пылевидную фракцию (менее 0,16 мм) в количестве до 50 %. Пылевидный отсев дробления (ОД) можно применять в качестве мелкого наполнителя в ячеистых бетонах. Рентгенограммы ОД свидетельствуют о наличии негидратированного портландцемента и цементного камня. Предлагается дополнительный помол для повышения прочностных характеристик изделий. Для ячеистого бетона важна прочность раствора межпорового пространства. При изготовлении пенобетона не следует применять пески с модулем крупности более 2, так как крупные частицы кварца увеличивают толщину межпоровых перегородок. Поэтому рекомендуется применять молотый ОД. При плотности пенобетона 600 кг/м^3 прочность составляет 2,5-2,8 МПа, что сопоставимо с автоклавными ячеистыми бетонами на основе кварцевого песка и золы-уноса ТЭЦ.

Научным коллективом СПбГАСУ была изучена проблема применения отходов камнедробления в технологии неавтоклавного фибропенобетона [15, 106]. Во время производства гранитного щебня образуются отходы дробления с максимальной крупностью 5 мм. Эти продукты переработки скальных пород обычно называют отсевом дробления, а чаще – отходами камнедробления (ОК). ОК на данный момент не утилизируются в промышленном масштабе. Наименее востребованным продуктом классификации ОК является пылевидная составляющая отхода камнедробления (ПОК) с максимальной крупностью 0,072 мм. Кафедрой ТСМиМ СПбГАСУ был предложен вариант утилизации ПОК в виде наполнителя в технологии неавтоклавного пенобетона. Минеральная

составляющая растворной смеси располагается в межпоровых перегородках, созданных пенными пузырьками. Следовательно, прочность проектируемого пенобетона определяется плотностью упаковки частиц цемента и заполнителя, находящихся в межпоровом пространстве. ПОК позволяет создать более плотную упаковку частиц наполнителя в сравнении с традиционным песком. Для пенобетона плотностью в сухом состоянии 1200 кг/м^3 на основе ПОК и кварцевого песка с модулем крупности 2 прочность составляла 6,0 МПа, что не уступает материалам на природных заполнителях. Мелкий (молотый) наполнитель положительно влияет на прочностные характеристики пенобетона, однако, при этом увеличиваются усадочные деформации. Небольшое количество крупного песка в составе наполнителя пенобетона, так же, как и крупный наполнитель в тяжелом бетоне, препятствует развитию усадочных деформаций.

Широкое применение в строительстве нашли продукты сгорания угля (угольные золы), которые с начала пятидесятых годов прошлого века используются в Великобритании [119]. Они применяются в составе вяжущего вещества в бетоне, заполнителя в кладочном растворе и для сооружения насыпей. Широкое использование побочных продуктов сгорания угля имеет значительный потенциал для снижения повсеместного выброса CO_2 , посредством замены природных заполнителей и частичной замены цемента. Европейский Союз и Великобритания вместе поддерживают увеличение использования вторичных и побочных продуктов, таких как зола-унос и зольный остаток.

Согласно [25], деформации усадки безавтоклавных ячеистых бетонов, изготовленных на основе цемента и песка, достигают 2 мм/м и более. Существенно уменьшить усадочные деформации можно путем введения в состав ячеистых бетонов некоторого количества крупных пористых заполнителей. Однако в работе [7] указывается на увеличение усадки при применении пористых заполнителей. Данные утверждения необходимо проверить в лабораторных условиях.

По мнению авторов [82] усадка пенобетона связана с его структурой, состоящей из пустотообразного цементного камня. Для уменьшения усадочных

деформаций применяют различные дисперсные заполнители. Деформации поризованного бетона естественного твердения определяли в соответствии с ГОСТ 25485-89 после 3, 8, 11, 14 и 17 суток, посредством наблюдения за изменением длины и массы образцов. Приведены результаты исследований влияние быстрого насыщения образцов пенобетона водой и их последующей сушки при 105 °С на усадочные деформации. Изменение длины и влажности фиксировались после каждого цикла, которых было 8. Показано, что мелкий песок увеличивает усадочные деформации, вследствие интенсивного удаления влаги. Быстрое удаление влаги уменьшает усадочные деформации, по сравнению с естественной сушкой. Даже когда изменение влажности не значительное, усадка образцов продолжалась. Авторы объясняют это контракцией бетона. Линейные усадочные деформации образцов при ускоренной сушке были почти в два раза меньше, чем у образцов, подвергнутых естественному высушиванию. Лучшими показателями отличается немолотый песок фракции до 2,5 вследствие положительного влияния на структуру пенобетона. По мнению Шаховой Л. Д., мелкий заполнитель создает жесткий каркас, который способствует повышению трещиностойкости изделий [112, 114].

Пенообразователи

Качественный пенообразователь позволяет получать техническую пену, которая вводится в сырьевую смесь для производства пенобетона с заданными характеристиками. В качестве стабилизаторов рекомендуется использовать высокодисперсные минеральные компоненты [14].

Для обеспечения большей стабильности, в процессе получения пеноконцентрата производится частичный гидролиз аминокислот. Авторы [9] приводят данные о применении в технологии неавтоклавно пенобетона пенообразователя производства итальянской фирмы *Laston SPA* из гидролизованного протеина. Данное пенообразующее вещество производится из натурального белкового сырья с добавкой антибактериальных инсектофунгицидов, которые препятствуют биодegradации и старению бетона. В состав пенообразователя входят небольшие количества изобутанола, хлорида

кальция и инертного минерального наполнителя. Замерзает пенообразователь при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пена гидролизованного белка держит большую массу цементно-песчаного теста, поры при этом получают закрытыми. Воздушные пузырьки диаметром 0,2-0,6 мм создают равномерную пористую структуру бетона. Жесткость воды следует понижать для лучшего пенообразования. Пенoконцентрат применяется в количестве от 2%, плотность пены составляет в среднем 70 г/л.

Критическая температура устойчивости пены в смеси составляет $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Протеиновые пенообразователи дают устойчивую пену при температуре смеси не выше $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, синтетические выше $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [64, 87].

При исследовании принципов формирования структуры пенобетонов, авторами [40] изучен вопрос стабилизации пен тонкодисперсными минеральными материалами. Пены представляют собой дисперсные системы газ-жидкость. Каркас пены состоит из практически плоских жидких пленок, являющихся стенками ячеек. В месте соединения трех пленок образуются ребра пузырька. При введении в качестве минеральных стабилизаторов вяжущих веществ, происходит превращение пены в высокопористый камень – пенобетон. Конфигурация пор определяется видом пенообразователя, кратностью вспенивания и устойчивостью пены. Увеличение кратности вспенивания ведет к повышению общей пористости, но при этом происходит утончение стенок пор, что ведет к понижению прочностных и деформативных характеристик. Для формирования прочной структуры межпорового пространства следует применять «жирные» пены.

Основными характеристиками, при проектировании составов поризованных материалов на основе белковых и синтетических ПАВ, являются пенообразующая способность и кратность пены [13, 26, 107]. К пенообразователям, применяемым в технологии неавтоклавного пенобетона, предъявляются требования по высокой пенообразующей способности и пеноустойчивости. Так же важны вопросы влияния типа пенообразователя на кинетику набора прочности. Доказано, что синтетические пенообразователи затормаживают набор прочности неавтоклавного пенобетона [49]. Модифицированная золями кремнекислоты пена

отличается повышенной устойчивостью. Это позволяет использовать заполнитель более крупной фракции и получать безугадочный пенобетон [88].

Добавки

Определение возможности применения добавок пластификаторов в технологии пенобетона требует проведения исследований для установления их влияния на структуру композита. Основной проблемой является несовместимость добавки и пенообразователя, приводящая к осадке смеси.

Большинство химических добавок оказывают незначительное влияние на усадку. Воздухововлекающие вещества почти не влияют на усадку при высыхании. Суперпластификаторы мало влияют на усадку, а пластифицирующие добавки могут ее увеличить [120]. К увеличению усадки приводит добавление хлористого кальция, используемого для ускорения твердения бетона [43].

Для уменьшения количества воды затворения в бетонной смеси, и, как следствие, снижения влажностной усадки, предлагается использовать пластификатор, совместимый с пенообразователем [37]. Например, пластификатор МатЭкос в виде сухой добавки.

Авторами [27] были исследованы различные гиперпластификаторы в технологии неавтоклавного пенобетона. Водопотребность смеси контролировалась по расплыву на приборе Суттарда (расплыв конуса составлял 160 мм). Большинство пластификаторов оказало отрицательное воздействие на качество пенобетонной смеси. Наилучший результат показали гиперпластификаторы *Melflux* 1641 и 2651 *F* (0,2-0,4% от ПЦ). С их использованием возможно достижение достаточно стойкой структуры пенобетонной смеси, а также значительное уменьшения водоцементного отношения, что приводит к укреплению межпоровых перегородок и повышению прочности пенобетона. Получен материал, соответствующий всем действующим нормативным документам.

Добавки наномодификаторы

Авторы [61, 111] основной задачей считают получение неавтоклавного ячеистого бетона со свойствами равными или выше автоклавных материалов.

Использование наномодификаторов сопровождается увеличением активности цемента и ростом прочности бетона. При этом наблюдается изменение межпоровых перегородок в ячеистом бетоне. При введении углеродных трубок наблюдается увеличение прочности на изгиб образцов с нанокатализатором.

А. М. Сычева в своих работах [89, 90] предлагает вводить комплексную добавку и древесную фибру в пенобетонную смесь. Образцы пенобетона с 1% древесной фибры плотностью 600 кг/м^3 характеризуются прочностью при сжатии 2,4 МПа, при изгибе – 1,1 МПа. Активированный пенобетон плотностью 800 кг/м^3 с 10% древесной фибры характеризуется прочностью при сжатии 4,6 МПа, при изгибе – 2,1 МПа. Активированный пенобетон плотностью 800 кг/м^3 с 3% комплексной добавки полисахаридов характеризуется прочностью при сжатии 4,3 МПа, при изгибе – 3,6 МПа. Возможна косвенная оценка трещиностойкости материала по отношению прочности при изгибе к прочности при сжатии. При введении комплексной добавки показано увеличение трещиностойкости материала почти в 2 раза.

В пенобетонную смесь, в качестве наноструктурированной добавки, вводился кремнезоль. Для пенобетона средней плотности 600 кг/м^3 введение 1% кремнезоля повышает прочностные, теплофизические и эксплуатационные параметры. Доказано повышение качества материала при введении наноструктур. Свойства материала сопоставимы с требованиями для автоклавных пенобетонов. Образцы пенобетона с кремнезолью, плотностью 600 кг/м^3 характеризуются прочностью при сжатии 3,6 МПа, при изгибе – 1,7 МПа. Отмечается кинетика прочности пенобетона плотности 600 кг/м^3 при естественном твердении от 2,5 МПа в третьи сутки до 4,3 МПа в девяностые. Автоклавный пенобетон плотностью 800 кг/м^3 , активированный кремнезолью, характеризуется прочностью при сжатии 5,4 МПа, при изгибе – 2,5 МПа.

Авторами статьи [91] установлено, что введение комплексной добавки, содержащей дисперсии твердых фаз коллоидного и неколлоидного размера, в технологии пенобетона, способствует получению материала улучшенного качества и снижению количества бракованных изделий. В работе [104] указано,

что введение даже малых количеств нанодобавки синтетических цеолитов для стабилизации параметров структуры композита оказывает положительное влияние на свойства пенобетона.

Расширяющиеся добавки

Проблема усадки пенобетона в работе [23] решается путем введения в сырьевую смесь высокоалюминатных и сульфатоалюминатных добавок, имеющих расширяющий эффект. Например, введением глиноземистого или высокоглиноземистого цемента, добавки «Алак», разработанной АО «НИИцемент» и типа «Бакур», разработанной Харьковским техническим университетом строительства и архитектуры. Эти добавки позволяют получить малоусадочные ячеистые бетоны. В данной работе объединены идеи баротехнологии и турбулентной активизации вяжущих материалов.

Автор [56] указывает на положительное влияние фибрового армирования на агрегативную устойчивость смеси. Это позволяет применять цементы с расширяющимися добавками в технологии пенобетонов. Экспериментально доказана возможность создания «безусадочного» материала. Предлагается регулировка собственных деформаций пенобетона в период интенсивного формирования структуры и развития усадочных деформаций рецептурным путем.

Положительным условием для развития производства пенобетона, по мнению авторов [2] является переход на малоэтажное строительство и удовлетворение требованиям к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций зданий и сооружений. К недостаткам пенобетона отнесены высокие показатели усадки этого материала. По ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. Технические условия» усадка при высыхании неавтоклавных пенобетонов не должна быть выше 3 мм/м. Усадочные деформации развиваются в два этапа. Первый, усадка, обусловленная давлением воды в капиллярах цементного камня при ее испарении. Второй этап обусловлен контракцией. Решать проблему усадки предлагается с помощью расширяющегося цемента. В данном виде вяжущего гидросульфатоалюминаты кальция после гидролиза интенсивно гидратируют с образованием игольчатых кристаллов, наиболее известным из которых является

эттрингит. Добавление 10 % сульфоалюминатной добавки позволяет снизить усадочные деформации пенобетона плотностью 700 кг/м^3 с 2,2 до 1,1 мм/м.

Однако дефицитность и высокая стоимость расширяющегося цемента в северо-западном регионе делает экономически невыгодным его использование в технологии неавтоклавного пенобетона. А высокоглиноземистый цемент характеризуется резким запахом, что делает невозможным его применение в жилищном строительстве.

В развитии своих исследований, Моргун В.Н. указывает на то, что алюминатосодержащие компоненты расширяющихся вяжущих негативно влияют на структуру межпоровых перегородок в безавтоклавных ячеистых бетонах [57]. Поэтому их применение не целесообразно. Дисперсное армирование, по мнению автора, снижает усадку, но не решает проблему полностью. Автор предлагает использовать напрягающий цемент в технологии фибропенобетона естественного твердения. Получают данный цемент путем введения расширяющей добавки. В данном случае автор тоже столкнулся с проблемой разрушения структуры пенобетонной смеси вследствие действия сульфатов и алюминатов, содержащихся в добавке. Деформации расширения достигают 7 мм/м. Для изготовления фибропенобетонных изделий автор предлагает использовать бездобавочный фибропенобетон с минимальными значениями объемных деформаций.

Изготовление ячеистого бетона

Технология изготовления оказывает существенное влияние на усадку изделий из фибропенобетона. Требуется обеспечивать тщательное перемешивание смеси для равномерного распределения различных видов волокон.

Разработкой оборудования для производства пенобетона занимается множество Российских предприятий. Основными агрегатами на линии по производству пенобетона является пенобетоносмеситель и пеногенератор. Формы должны быть высокоточными для сохранения правильной геометрии изделий и последующей их кладки на клей. Это приводит к сокращению толщины клеевого

шва и уменьшению теплопроводности, исключает образование «мостиков холода», что позволяет возводить теплоэффективные здания из пенобетона.

Технология ячеистых бетонов предусматривает автоклавное или неавтоклавное твердение. Производство неавтоклавного пенобетона отличается низкими капиталовложениями и энергозатратами. Возможно переоснащение отдельных цехов заводов ЖБИ под производство неавтоклавного пенобетона. При этом применяется различное оборудование, технологические схемы и методы производства. Для изготовления автоклавного газобетона модернизируют заводы силикатного кирпича [3, 10, 29, 110].

В работе О.В. Коротышевского [41] представлена технология получения пенобетонов мелкодисперсной пористости (диаметр пор менее 0,8 мм) турбулентно-кавитационным способом. Специальный смеситель способствует равномерному распределению пузырьков воздуха по объему смеси, которые стабилизируются пенообразователем и армируются частицами цемента и песка. Осадка смеси практически отсутствует благодаря высокой устойчивости смеси и «несжимаемости» пузырьков из-за наличия в них избыточного давления. Используемый герметичный смеситель является пневмокамерным насосом для формования изделий.

Разработан технологический способ приготовления пенобетона методом сухой минерализации, который включает в себя минерализацию низкократной пены сухим порошком вяжущего. Происходит стабилизация пены и предотвращение синерезиса за счет «бронирования» воздушных пузырьков, закупорки каналов Плато твердыми частицами и сорбции свободной воды сухим вяжущим [36]. Пена с полифракционной сферической пористой структурой придает пенобетону высокие звукопоглощающие свойства в широком диапазоне частот. С целью повышения прочности при изгибе изделий и усиления акустических свойств в состав вводится армирующий фиброкомпонент. Интересным технологическим методом является «обжатие-релаксация», согласно которому процесс приготовления пенобетонной смеси производится при избыточном давлении, то есть в обжатом состоянии пены и пенобетонной смеси.

Далее происходит релаксация пенобетонной смеси до исходного объема за счет плавного снятия обжимающего усилия и выравнивания давления внутри смеси до атмосферного.

Для сохранения структуры материала применяется баротехнология [95]. Перемешивание и транспортировка осуществляется под избыточным давлением в герметичном смесителе. При этом поры получаются замкнутые, что приводит к улучшению показателей водопоглощения и морозостойкости.

Авторы [96] предлагают усовершенствовать баротехнологию пенобетона. В пенобетон, приготовленный на турбулентном смесителе, вводят волокна армирующего материала (рубленое базальтовое волокно или хризотил асбест). Волокно предварительно обрабатывается жидким стеклом. Так же применяются волокна «Фибрин» (полипропилен). Для сокращения расхода цемента при сохранении заданной прочности возможно использование высокоактивной минеральной добавки – микрокремнезема. Его сферические частицы окружают каждое зерно цемента, заполняют пустоты продуктами гидратации, так что 1 кг микрокремнезема может заменить 20 кг портландцемента.

В установке «Санни» для производства пенобетона процесс образования пеносмеси происходит под давлением, что позволяет получать материал с мелкодисперсной замкнутой пористостью [86]. Автомат для распалубки и укладки готовых блоков на поддоны позволяет исключить ручной труд при производстве пенобетона. Автоматическая линия по производству неавтоклавного пенобетона без применения резательного оборудования является уникальной по своим технико-экономическим характеристикам.

Отечественная технология получения автоклавного резательного пенобетона, представленная в [92], требует меньших капиталовложений, чем газобетонная. При этом качество ячеистобетонных изделий остается на высоком уровне.

В научном исследовании Ю. В. Пухаренко [73] отмечены особенности формирования структуры ячеистого фибробетона. Дисперсное армирование приводит к улучшению эксплуатационных свойств и к повышению долговечности

изделий и конструкций. Во время перемешивания смесь претерпевает различные изменения. В результате введения синтетических нитей возможно сближение частиц цемента и заполнителя, образуется пространственный каркас. В случае использования коротких фибр создание каркаса требует большого их количества. Однако содержание волокон выше определенного уровня вызовет их комкование, приводящее к осадке смеси и увеличению массы изделий. При содержании фибры более 1 % по массе, волокна сдерживают осадку смеси, сохраняя ее устойчивость до начала формирования минераловолокнистой структуры фибробетона. Во время приготовления смеси, армирующие волокна равномерно распределяются по объему, образуют пространственный каркас, размер ячеек которого определяется геометрическими характеристиками фибр и их объемной концентрацией. В фиброармированной смеси наличие поверхностей раздела в виде волокон исключает возможность укрупнения пор за счет их слияния, существенно укрепляет перегородки. Это снижает пластические деформации в период проведения технологических операций. Вследствие углубления физико-химического взаимодействия компонентов вблизи поверхности волокон, по сравнению с остальным объемом, в системе образуется фиброцементный каркас, который характеризуется высокой устойчивостью и пластической прочностью.

Автор [50] отмечает, что процессы гидратации неавтоклавных пенобетонов не завершаются к 28 суткам твердения. Неавтоклавные пенобетоны подвержены всем видам цементной коррозии и имеют более низкую прочность, чем автоклавные газосиликаты. Ускорить реакцию гидратации портландцемента можно за счет механической активации клинкерообразующих минералов в водной среде. Ускоренная гидратация должна проходить одновременно с процессами формирования высокопрочной структуры. За счет механохимической активации цементной суспензии в присутствии неорганической добавки и одновременным введением в неё полимерного модификатора достигается ускорение набора прочности и повышение физико-механических свойств пенобетона.

В пенобетоне даже после 28 суток твердения продолжается гидратация цемента и, соответственно, набор прочности. Этим обусловлены высокие усадочные деформации.

Особенности технологии ячеистого фибробетона изложены в работе [74]. Во время приготовления смеси происходит армирование бетона волокнами. Обеспечение равномерности распределения является главной задачей для получения материала с улучшенными свойствами. Приготавливается фибробетонная смесь в смесителях нового типа, либо в существующих серийно выпускаемых аппаратах. Некоторые виды неметаллических волокон требуют предварительной распушки для разделения отрезков комплексных нитей на элементарные волокна. При этом возрастает число волокон в объеме смеси, что улучшает свойства фибробетона в процессе приготовления смеси.

После набора распалубочной прочности происходит резка по заданным размерам или выпрессовка готовых ячеистобетонных изделий. Для получения изделий используют индивидуальные и кассетные формы, к недостаткам которых можно отнести низкую оборачиваемость, высокую металлоемкость, значительную часть ручного труда при обслуживании, зависимость качества изделий от состояния оснастки, ограниченную номенклатуру выпускаемой продукции [47]. По мнению авторов, использование кассетного способа производства является нецелесообразным. В свою очередь, резательная технология имеет свои сложности и требует высокой культуры производства. Струны для резки требуют частой замены, при попадании в смесь крупных частиц возможен их разрыв.

Одним из способов производства высокоточных фибропенобетонных изделий является метод выдавливания готовых изделий на поддон в автоматическом режиме, внедренный впервые на заводе ООО «Декор-Строй». Технология включает в себя неразборные формы и специальный пресс, с помощью которых возможно производство всех видов изделий для индивидуального домостроения: блоки для несущих стен, пазогребневые плиты для межкомнатных перегородок, изделия специальной формы для перемычек и перекрытий.

Авторы [80] предлагают технологию монолитного пенобетона с применением несъемной опалубки. Одной из проблем этой технологии является необходимость послойной укладки пенобетонной смеси с целью исключения осадки. При этом не учитывается высокое содержание воды в пенобетонной смеси, и последующая миграция влаги из твердеющего массива. В условиях монолитного формирования в несъемную герметичную опалубку, влага остается в массиве пенобетона, что приводит к образованию плесени и грибков. Разработчики технологии предлагают покрывать внутренний слой опалубки противогрибковыми средствами, что в реальных условиях не является решением проблемы. Для нормальной эксплуатации пенобетонных изделий, их влажность не должна превышать 25 %, чего сложно добиться в условиях несъемной опалубки.

При возведении конструкций из ячеистого бетона монолитным способом наружная опалубка представляет собой цементно-стружечные плиты или кирпичную кладку. Внутренние стены облицовывают ЦСП или водостойким гипсокартоном. Смонтированная опалубка заполняется монолитным пенобетоном. Во время укладки пенобетонной смеси в опалубку возникает ряд технологических проблем. Возможны протечки смеси, образование подтеков, пустот внутри опалубки. Гипсокартон деформируется, избыточная влага уходит в стыки опалубки, что приводит к короблению. Смесь при этом оседает [80]. Решением проблемы может послужить использование пластификаторов для уменьшения количества воды в сырьевой смеси. Однако большинство добавок негативно влияет на структуру пенобетона, что так же приводит к осадке смеси.

В работе [66] рассматривается технология производства сборно-монолитных перекрытий из мелких ячеистобетонных блоков. Такие перекрытия состоят из блоков, которые разложены на досках, подпертых внизу стойками. В зазоры между торцами блоков закладывают арматурные каркасы на фиксаторы защитного слоя. Блоки и доски образуют опалубку для балки из мелкозернистого бетона. Проведены успешные испытания фрагмента перекрытия на прочность, жесткость, трещиностойкость, ползучесть и выдавливание отдельного блока.

Контроль качества

Требования к изделиям из ячеистых бетонов и метод измерения усадочных деформаций изложены в следующих нормативных документах: «ГОСТ 25485. Бетоны ячеистые. Технические условия»; «ГОСТ 21520. Блоки из ячеистых бетонов стеновые мелкие»; «СН 277. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона». В них существуют разные требования на одни и те же параметры, такие как отпускная влажность, допуски по плотности, коэффициент теплопроводности. Для теплопроводности важен показатель при эксплуатации, так как данные сухих образцов не подходят для реальных условий. Отпускная влажность не должна превышать 25 % [20, 67, 84]. Каждое предприятие-изготовитель создает свои технические условия, опираясь на нормативные документы.

При проверке предприятий Санкт-Петербурга по производству пенобетона на соблюдение обязательных требований нормативных документов, отмечены основные нарушения при проведении контрольных испытаний отпускной влажности, средней плотности и прочности пенобетонных изделий. Продукция, не соответствующая нормативным характеристикам, выпускается вследствие несоблюдения технологии производства и применения некачественных материалов. Недопустимо использовать цементы с кислыми минеральными добавками. На заводах не корректируются сырьевые составы в зависимости от качества применяемых материалов. Выпуск высококачественного пенобетона возможен при соблюдении требований ГОСТ и профессионального подхода [39].

Условия хранения готовых изделий

Трещинообразование в пенобетоне связывают с влажностной усадкой. Натурные обследования авторами [37] пенобетонных плит плотностью 150 кг/м^3 , свидетельствуют о существенной роли карбонизации новообразований цементного камня при усадке. Связь усадки при карбонизации и усадки при высыхании была изучена в реальных условиях. Пенобетонные плиты, оставленные на строительной площадке, имели трещины на поверхности, а через некоторое время они разрушились. В подвальном помещении, через 2 года

трещин на плитах не появилось. Карбонизация гидратных новообразований цементного камня в пенобетоне видна по светлым желтовато-белым слоям по срезу изделия.

Влияние внешних факторов

Из-за своей пористой структуры, пенобетон подвержен влиянию внешних факторов, таких как влажность и температура. Изделия должны равномерно высыхать и быть защищены от воздействий окружающей среды. При условии монолитной технологии, увлажнение и поливка водой снижают скорость усадки и смягчают влияние внутренних напряжений [43].

К причинам, обуславливающим уменьшение объема цементного камня в процессе сушки, относят стремление вогнутого мениска (поверхность жидкости в месте её соприкосновения с поверхностью твёрдого тела) уменьшить свою поверхность. Это создает отрицательное давление, и стенки капилляров цементного камня испытывают действие капиллярных сил, стремящихся вызывать их сжатие. Чем ниже относительная влажность воздуха, тем меньше радиус капилляров, в которых образуются мениски. Уменьшение относительной влажности воздуха при постоянном давлении приводит к увеличению капиллярного давления, а, следовательно, и к увеличению усадки цементного камня [115].

Хотя условия окружающей среды напрямую не влияют на полную усадку бетона, они оказывают влияние на скорость, с которой происходит испарение, которая, в свою очередь влияет на скорость усадки. Если относительная влажность уменьшается, то скорость сушки увеличивается. Высокая температура имеет тот же эффект. Условия окружающей среды важно учитывать во время формирования бетона. Если должного ухода за бетоном не предусмотрено, высокая температура в сочетании с низкой относительной влажностью и ветром, могут привести к чрезмерной пластической усадке [120]. В работах А.Е. Шейкина, К.Г. Красильникова, Н.Н. Скоблинской, З.Н. Цилосани отмечено влияние относительной влажности на усадку неавтоклавного бетона [81].

Усадка пенобетона оказывает негативное влияние на его эксплуатационные свойства [83]. Это обусловлено повышенным расходом цемента, высокой площадью удельной поверхности межпоровых перегородок в структуре пенобетона, капиллярной пористостью, величина которой составляет 20-40 % от объема твердой фазы. Высокая чувствительность изделий из пенобетонов к колебаниям относительной влажности окружающей среды также связана с усадочными деформациями. Развитие усадочных деформаций исследователи наблюдали в течение 1 года. Характер деформаций в первые 90 дней с момента их изготовления идентичен. Далее фибропенобетонные образцы демонстрируют затухание деформаций усадки, пенобетон продолжает ее наращивать. Это значит, что в структуре продолжают развиваться массообменные процессы, приводящие к росту дефектности межпоровых перегородок.

1.4 Эффективность применения армирующих волокон для снижения усадки ячеистого бетона

Усадочные явления приводят к возникновению растягивающих напряжений, которые являются причиной трещинообразования [31]. Большинство исследователей отмечают [4, 8, 12, 32, 33, 37, 44, 45, 51-55, 60, 70-72, 77, 105, 118], что эффективное решение проблемы – это применение различных видов армирующих волокон, способных воспринимать растягивающие напряжения по всему объему изделия. Волокна разделяют на два типа: низко модульные, например полипропиленовые, с характерным для них большим относительным удлинением при разрыве и высоко модульные, например базальтовые. Синтетические волокна на основе полипропилена характеризуются повышенной деформативностью и химической стойкостью. Перспективы применения базальтовых волокон зависят от их устойчивости к воздействию щелочной среды гидратирующего цемента. Возможно применение в качестве армирующего

материала волокон асбеста (хризотил-асбест). Эти волокна отличаются малой длиной и трудностью распушки [77].

В своих работах Ю. В. Пухаренко предлагает ряд мер для снижения усадки неавтоклавных пенобетонов [70 - 72]. Это рациональный выбор заполнителей, введение фибры, применение заполнителей полифракционного состава. На кафедре технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ накоплен большой опыт применения синтетических волокон в пенобетонных смесях. Получены результаты, доказывающие увеличение прочности при изгибе. Доказано положительное влияние дисперсного армирования на поровую структуру материала. Показано снижение водопоглощения и капиллярного подсоса. Морозостойкость ячеистого фибробетона составляет около 100 циклов. Дисперсное армирование ячеистого бетона неметаллическими волокнами (минеральными, полимерными) позволяет значительно снизить усадочные деформации, исключает появление трещин, обеспечивает существенное улучшение прочностных свойств материала. При выпуске пробных партий стеновых блоков доказано, что даже небольшая добавка в смесь полипропиленовых волокон исключает появление усадочных трещин в изделиях.

При исследовании атмосферостойкости неавтоклавного фибропенобетона установлена стойкость армированных образцов даже после 100 циклов попеременного увлажнения и высушивания. При этом проявляется армирующий эффект волокон, которые воспринимают растягивающие напряжения и препятствуют развитию микротрещин в бетоне. Прочность на сжатие не меняется, так как дисперсное армирование не оказывает влияние на данный показатель. При введении синтетических волокон повышается атмосферостойкость ячеистых бетонов.

Фибровое армирование в процессе приготовления пенобетонной смеси влияет главным образом на реологические свойства. Во время протекания усадочных деформаций фибра воспринимает растягивающие напряжения, но эластичные низко модульные волокна полипропилена не могут эффективно препятствовать этому процессу. Решением проблемы может стать совместное

армирование высоко- и низко модульными волокнами с разными характеристиками, которые существенно улучшают свойства фибропенобетона, по сравнению с моноармированным вариантом [72].

Л.В. Моргун в своих трудах [51 - 53] называет фибропенобетон одним из самых эффективных стеновых и теплоизоляционных материалов. Автор указывает на достоинства дисперсного армирования синтетическими волокнами ячеистобетонных материалов. Фибра становится структурообразующим компонентом в пенобетонных смесях. Благодаря этому ячеистая структура дольше сохраняется, смесь обладает большей устойчивостью к расслоению и осадке. Дисперсная арматура в виде синтетических волокон улучшает конструкционные свойства пенобетона, в том числе прочность на растяжение. Однако, при введении фибры в смесь, возникает проблема равномерного распределения по объему. Существует определенный предел насыщения, после которого фибра начинает комковаться.

Разрушение пенобетона под действием нагрузок идет хрупко. В дисперсно-армированных фибропенобетонах трещина, достигнув поверхности волокна, приостанавливает свое движение. Это вызвано тем, что модуль упругости фибры больше модуля упругости ячеистого бетона. При разрыве матрицы, фибра оказывается способной в определенном диапазоне напряжений воспринимать нагрузку самостоятельно. Трещины, возникающие в бетонной матрице при напряжениях ниже предела упругости волокна, будут носить обратимый характер при условии снятия нагрузки. Для того чтобы трещина в фибропенобетоне могла продолжить свое развитие, напряжениям необходимо либо разорвать волокно, либо выдернуть его из бетонной матрицы [52]. Дисперсное армирование повышает прочность и однородность свойств пенобетонов.

Важной характеристикой фибропенобетона является огнестойкость, то есть способность выдерживать длительное воздействие открытого огня без разрушения. Причиной хрупкого разрушения материала в данных условиях является его низкая прочность при растяжении. Для повышения этого показателя предложено применять дисперсное армирование пенобетонов волокнами. У

фибропенобетонов, по сравнению с пенобетоном, теплопроводность меньше при одной и той же плотности. Плотность межпоровых перегородок в фибропенобетоне выше. Эти факторы повышают противопожарные свойства фибропенобетона. Испытания фибропенобетона показали, что растрескивание образца плотностью 600 кг/м^3 под воздействием огня начинается на 15 мин позже, чем у пенобетона [58]. При $678 \text{ }^\circ\text{C}$ состояние фибропенобетонного образца остается без видимых изменений. При температуре $840 \text{ }^\circ\text{C}$ пенобетонные образцы разделяются на части. При повышении температуры до $894 \text{ }^\circ\text{C}$ образец фибропенобетона разламывается с образованием глубоких трещин. Предел огнестойкости образца из фибропенобетона толщиной 120 мм равен 45 мин, пенобетона – 30 мин при равной плотности.

В результате исследования [54] было установлено, что дисперсная арматура из стекла, в отличие от синтетической фибры, не обладает гибкостью, разрушает межпоровые перегородки, взаимодействует со щелочами цемента и не сохраняет размеры и форму после затвердевания смеси.

В работе [55] доказывается, что ввод в состав обводненных зернистых дисперсных систем дисперсной арматуры способствует повышению уровня их самоорганизации и положительно влияет на интенсивность межчастичных взаимодействий.

Существуют различные точки зрения о разрушении базальтового волокна в агрессивных средах [5, 6]. В Казанском ГАСУ проведены исследования по повышению долговечности базальтовой фибры в цементных бетонах [12]. Базальтовое волокно с течением времени теряет часть прочности, находясь в среде гидратирующего цемента. Это вызвано взаимодействием с выделяющейся в процессе твердения гидратной известью. Для повышения стойкости базальтовых волокон в цементных системах, предлагается использовать добавку микрокремнезема, которая позволяет снизить количество свободной извести в среде гидратирующего цемента.

В качестве армирующей добавки в пенобетонах неавтоклавного твердения предлагается использовать хризотиловое волокно [32]. Хризотиловое волокно

играет активную роль в процессе гидратации цемента, что улучшает физико-механические характеристики цементного камня. Перед добавлением в ячеистобетонную смесь хризотил-асбест нужно распушить для равномерного распределения в объеме. Возможность использования хризотилового волокна для армирования пенобетона подтверждена лабораторными исследованиями и опытно-промышленными образцами. Для пенобетонов малых плотностей предлагается использование минерального волокна [33].

Исследования в области применения смешанных волокон представлены в научных работах [8, 33]. Применение полиармирования обусловлено необходимостью предотвращения образования микро- и макротрещин. В технологии тяжелого бетона применяются такие сочетания с использованием фибр различной длины, в частности смеси стальных и полипропиленовых волокон. Их использование понижает пластическую усадку в процессе трещинообразования. Применение полипропиленовой фибры в бетонах снижает вероятность образование усадочных трещин на 60-90 %. Корректируя соотношение объема комбинации волокон, возможно направленное регулирование свойств материала. Это приводит к повышению трещиностойкости, коррозионностойкости, атмосферостойкости, стойкости к переменному увлажнению-высушиванию, замораживанию-оттаиванию [8].

Взаимовлияние синтетических и асбестовых волокон на микро- и макроуровне в результате их совместного введения в смесь обеспечивает повышение прочностных характеристик и трещиностойкости ячеистого бетона. Распущенный асбест, располагаясь в межпоровых перегородках, уплотняет их за счет создания вокруг волокон зон бетона с улучшенными свойствами. Это приводит к увеличению прочности сцепления синтетических волокон с бетоном и, следовательно, прочности материала в целом. Синтетические волокна диаметром 15-25 мкм обладают весьма развитой поверхностью и выполняют функцию барьеров на пути распространения трещин, улучшают условия работы асбеста по повышению трещиностойкости композита [118].

Дисперсное полиармирование, предусматривающее использование комбинации фибр с различными характеристиками, является перспективным способом снижения усадки фибропенобетона.

Выводы по первой главе:

1. На основе проведенного анализа литературных источников отмечены основные характеристики неавтоклавного ячеистого бетона. Фибропенобетон имеет некоторые преимущества по сравнению с другими строительными материалами, но есть и ряд недостатков. К ним относятся высокие усадочные деформации.

2. Для уменьшения усадки неавтоклавного пенобетона следует снижать расход вяжущего вещества и водотвердое соотношение. Тонкодисперсные минеральные наполнители и цементы с высокой удельной поверхностью положительно влияют на структуру ячеистого бетона, но способствуют увеличению усадки. Крупный песок в составе наполнителя пенобетона препятствует развитию усадочных деформаций.

3. Эффективным способом снижения усадки является применение армирующих волокон. При введении фибры наблюдается увеличение прочности при изгибе, стабилизация поровой структуры материала, повышается атмосферостойкость, практически исключается вероятность появления усадочных трещин в изделиях из ячеистого бетона.

4. Наиболее эффективным приемом снижения усадки является дисперсное полиармирование, предусматривающее использование комбинации фибр с различными характеристиками.

Были сформулированы рабочая гипотеза, цель и задачи исследования:

Рабочая гипотеза: Высокомодульные волокна сдерживают усадочные деформации и блокируют образование трещин в плотных межпоровых перегородках с момента начала формирования структуры и при последующей эксплуатации фибропенобетона. Низкомодульные волокна исключают развитие усадочных явлений и трещинообразование на уровне макроструктуры композита.

Таким образом, на микроуровне высокомодульных межпоровых перегородок следует применять фибру с высоким модулем упругости, а на макроуровне – низко модульные волокна. При этом эффективность зависит от дисперсности армирования, которая определяется размерами применяемых волокон. Это позволяет сдерживать усадочные деформации на всех структурных и масштабных уровнях фибропенобетона.

Цель исследования – теоретическое обоснование и разработка вариантов дисперсного полиармирования фибропенобетона для снижения усадочных деформаций.

Задачи исследования:

1. Изучение влияния дисперсного армирования на усадочные деформации и прочностные характеристики пенобетона неавтоклавного твердения.

2. Исследование зависимости и степени изменения усадки полиармированного фибропенобетона от вида, свойств волокон и параметров фибрового армирования.

3. Определение комбинаций армирующих волокон, обеспечивающих снижение усадочных деформаций, повышение прочности и трещиностойкости фибропенобетона.

4. Разработка эффективного состава ячеистого фибробетона, армированного одновременно несколькими видами волокон.

5. Выпуск опытно-промышленной партии фибропенобетонных изделий на действующей технологической линии, проведение натурных испытаний и сравнение полученных данных с результатами лабораторных исследований.

6. Разработка нормативно-технических документов и внедрение разработанных составов неавтоклавного полиармированного фибропенобетона в производство с обеспечением технико-экономического эффекта.

2. ВЫБОР ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Применяемые материалы

Для проведения исследований использованы сырьевые материалы, доступные в Северо-Западном регионе. Учтена возможность применения данных материалов в условиях опытно-промышленного производства.

Портландцемент. Для ячеистых бетонов неавтоклавного твердения применяется портландцемент без добавок, не ниже марки 400 по ГОСТ 10178 или класса 32,5 по ГОСТ 31108, так как менее активные цементы не обеспечивают достаточно быстрый набор прочности ячеистой массы и тем самым могут привести к осадке смеси. В качестве вяжущего вещества для фибропенобетона повышенной плотности применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н завода ООО «ЛСР. ЦЕМЕНТ-СЗ» (г. Сланцы Ленинградской области). Цемент сертифицирован по ГОСТ 31108. Химический состав клинкера, мас. %: CaO 63.79, SiO₂ 20.73, Al₂O₃ 4.39, Fe₂O₃ 2.26, MgO 3.22, SO₃ 1.42, R₂O 1.15. Минеральный состав клинкера, мас. %: C₃S 60.1, C₂S 14.5, C₃A 6.3, C₄AF 9.9. Физико-механические свойства цемента представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Физико-механические свойства цемента

Наименование показателя	ЦЕМ I 42,5 Н	Требования ГОСТ 31108
Тонкость помола: проход через сито №008, мас. %	98,9	не нормируется
Удельная поверхность по Блейну, см ² /г	3491	не нормируется
Сроки схватывания, мин		
начало	191	не ранее 60 мин
конец	238	не нормируется
Равномерность изменения объема (Ле-Шателье), мм	2,0	не более 10 мм
Нормальная плотность цементного теста, %	29,2	не нормируется
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	49,0	42,5-62,5 МПа

Наполнитель. Для бронирования пленок пены и создания устойчивой мелкопористой структуры необходимо применять мелкодисперсные наполнители. К таким наполнителям можно отнести мелкий кварцевый песок, золу-унос, отходы дробления гранитного щебня, минеральный порошок, микрокремнезем. В сочетании с более крупным песком и цементом, такие наполнители создадут прочную границу раздела между пузырьком воздуха и твердой фазой. В качестве наполнителя в технологии фибропенобетона может применяться минеральный порошок неактивированный МП-1. Для сокращения усадочных деформаций в сырьевой смеси следует использовать смесь тонкодисперсного минерального наполнителя и крупного песка. Применялись два вида наполнителей разной крупности: песок и минеральный порошок. Гранулометрический состав речного песка (ОАО «Новгородский порт») представлен в таблице 2.

Таблица 2 - Гранулометрический состав песка

Остатки на ситах	Размер отверстий сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	Менее 0,14 мм
Частные, %	3,4	6,6	26,7	39,8	16,1	7,4
Полные, %	3,4	10	36,7	76,5	92,6	100

Модуль крупности песка $M_{кр} = 2,2$; насыпная плотность 1544 кг/м^3 . В соответствии с ГОСТ 8736, содержание илистых и глинистых примесей составляет не более 3% [21].

Минеральный порошок МП-1 (неактивированный) ОАО «Новоизборский комбинат нерудных материалов» производится в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52129. Характеристики МП-1 представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Характеристики МП-1

Наименование показателя	МП-1 неактивированный	Требования ГОСТ Р 52129
Зерновой состав, % по массе		
мельче 1,25 мм	100	не менее 100
мельче 0,315 мм	93,7	не менее 90
мельче 0,071 мм	73,8	от 70 до 80
Удельная поверхность по ПСХ-2, $\text{см}^2/\text{г}$	4400	не нормируется
Содержание $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, % по массе	1,7	не более 1,7

Пенообразователи. Пенообразователи можно разбить на две группы: белковые и синтетические. Белковые пенообразователи характеризуются высокой устойчивостью и меньше, чем синтетические, замедляют гидратацию клинкерных минералов. Синтетические пенообразователи отличаются более низкой стоимостью, легче вспениваются, имеют более длительный срок хранения, устойчивы к введению химических добавок. Для создания ячеистой структуры фибропенобетона применялись белковые и синтетические пенообразователи, которые характеризуются стабильными показателями качества.

Белковые пенообразователи: «*Laston*», «*GreenFroth*» (Италия, поставщик: ООО «Строй-Бетон») и *Reniment SB31L (Audax-Keck GmbH*, Германия).

Технические характеристики:

- вид – темно-коричневая жидкость;
- активное вещество – протеингидролизат;
- плотность при 20 °С – 1,12 г/см³;
- кратность – 24;
- температура применения – до -15 °С.

Синтетический пенообразователь – ПБ-Формула 2012 (ООО «Ивановская химическая компания», г. Иваново) по ТУ 2481-185-05744685-01. Физико-химические свойства ПБ-Формула 2012 представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Физико-химические свойства ПБ-Формула 2012

Плотность при 20 °С, кг/м ³	1000-1150
Кратность пены рабочего раствора с объёмной долей 4%, не менее	8,0
Устойчивость пены, %, не более	5

Армирующие добавки. К армирующим волокнам предъявляется ряд требований, среди которых химическая стойкость и превышение модуля упругости фибры относительно модуля упругости бетона. Наиболее подходящими для ячеистого бетона являются синтетические волокна, модуль упругости которых в 2-3 раза выше модуля упругости ячеистого бетона [71]. В сырьевую смесь вводились различные армирующие волокна: полипропиленовая фибра (ЗАО «СОТ») по ТУ 5743-001-33181456; базальтовая фибра (ОАО

«Ивотстекло») по ТУ 5952-036-05328981; хризотил-асбест («ОАО НИИпроектасбест», г. Асбест) марок А-6-50, А-5-70 и А-6К-30. Характеристика армирующих волокон по Ф. Н. Рабиновичу приведена в таблице 5. Для сравнения: модуль упругости ячеистого бетона 3000 МПа, тяжелого – 30000 МПа.

Таблица 5 - Характеристика армирующих волокон

Вид волокна	Диаметр волокна, мм	Длина волокна, мм	Плотность, г/см ³	Удлинение при разрыве, %	Прочность на растяжение, МПа	Модуль Юнга, МПа
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Полипропиленовое	0,018	12,00	0,9	10,0-25,0	400-770	3500-8000
Базальтовое	0,018	12,00	2,6	1,4-3,6	1600-3600	80000-110000
Хризотиловое	0,028	1,35	2,6	0,5-0,7	910-3100	68000

Определение расчетного состава

Расчет состава фибропенобетона на основе минерального порошка и кварцевого песка был проведен в соответствии методическими указаниями [75]. Определение расчетного состава приведено в приложении 2.

Рабочий состав пенобетона был взят за основу, при условии дальнейшей его корректировки. Во время проведения лабораторных замесов пена вводилась до достижения расчетной плотности смеси. Дозировка фибровой арматуры производилась в соответствии с рекомендациями изготовителей и исходя из экономической целесообразности.

2.2 Лабораторное оборудование

Для приготовления фибропенобетонной смеси использовалась лабораторная установка оригинальной конструкции, представленная на рисунке 3, которая состоит из пенобетоносмесителя, пеногенератора и воздушного компрессора. Пеногенератор установки используется для приготовления пены из белкового пенообразователя и состоит из насоса и трубки со специальной набивкой. Лабораторный пеногенератор представлен на рисунке 4. Возможна настройка требуемой плотности и скорости подачи пены. Пена поступает в

пенобетоносмеситель с лопастями, обеспечивающими равномерное перемешивание. Лабораторный пенобетоносмеситель представлен на рисунке 5.



Рисунок 3 - Лабораторная установка для приготовления фибропенобетонной смеси

Процесс образования пенобетонной смеси происходит под давлением, что позволяет получать материал с мелкодисперсной замкнутой пористостью. Подача готовой смеси в стандартные формы осуществляется шлангом за счет избыточного давления, создаваемого в пенобетоносмесителе. В случае применения синтетического пенообразователя, используется дрель со вспенивающей насадкой. Дрель со вспенивающей насадкой представлена на рисунке 6. Сушка образцов-балочек при 105°C производилась в сушильном шкафу. Сушильный шкаф представлен на рисунке 7.

Лабораторный пенобетоносмеситель и пеногенератор являются аналогами промышленного оборудования для производства пенобетона. В заводских условиях автоматическая линия с автоматом для распалубки и укладки готовых блоков на поддоны позволяет сократить ручной труд.



Рисунок 4 - Лабораторный пеногенератор

- 1 - Подача воздуха
- 2 - Подача раствора пенообразователя
- 3 - Выход пены
- 4 - Пуск насоса
- 5 - Регулятор давления насоса
- 6 - Пуск подачи воздуха в пеногенератор
- 7 - Регулятор давления воздуха
- 8 - Манометр

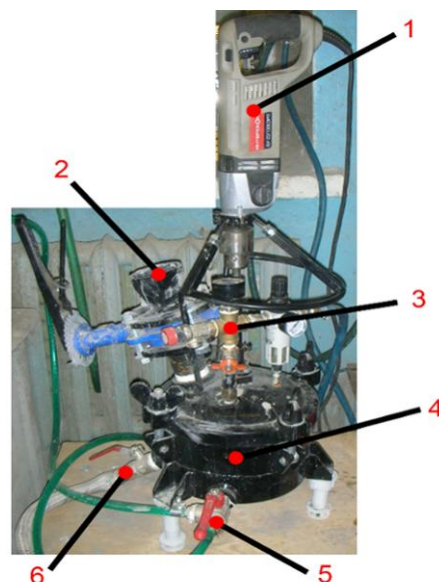


Рисунок 5 - Лабораторный пенобетонсмеситель

- 1 - Привод для перемешивания смеси
- 2 - Загрузочная горловина
- 3 - Система подачи избыточного давления
- 4 - Емкость пенобетонсмесителя
- 5 - Патрубок для подачи пены
- 6 - Разгрузочный рукав



Рисунок 6 - Дрель со вспенивающей насадкой



Рисунок 7 - Сушильный шкаф

Для определения значений усадки при высыхании неавтоклавного фибропенобетона применялся прибор, представляющий собой штатив с электронно-цифровым индикатором (точность 0,01 мм). Вывод данных электронно-цифрового индикатора на компьютер производится с помощью кабеля *USB*. Интерфейс с кнопкой передачи позволяет заносить значения напрямую в электронную таблицу без специального программного обеспечения.

Изменение массы образцов фиксировалось с помощью весов. Прибор для измерения усадки представлен на рисунке 8. Весы представлены на рисунке 9.



Рисунок 8 - Прибор для измерения усадки



Рисунок 9 - Весы

2.3 Методика изготовления образцов. Определение усадки при высыхании

Лабораторный замес осуществляется в пенобетоносмесителе, где перемешивание компонентов механизировано. Параллельно перемешиванию смеси воды, цемента и заполнителя, изготавливается пена из рабочего раствора пенообразователя.

Для получения пенобетона с равномерной структурой необходимо тщательно перемешать пену с растворной смесью. Пенобетонная масса считается готовой тогда, когда она становится вполне однородной по цвету и на поверхности ее перестают появляться следы пены.

Дозировка пены осуществляется до достижения необходимого объема пенобетонной смеси. Фибра вводится в воду затворения или непосредственно в пенобетонную смесь. Корректировка плотности пены и пенобетонной смеси выполняется при помощи весов и мерной емкости. После перемешивания,

приготовленная пенобетонная смесь заливается в стандартные формы, предварительно покрытые тонким слоем смазки.

Образцы-кубики выдерживаются сутки в нормальных условиях, а затем еще 8 часов в пропарочной камере при температуре 80°C. За это время образцы набирают до 80% проектируемой прочности. После пропарки образцы извлекаются из форм и высушиваются до постоянной массы. Далее образцы взвешивают, измеряют и испытывают на сжатие [18]. Образцы-балочки до испытаний на усадку хранятся в соответствии с ГОСТ 25485. После определения усадки, образцы-балочки испытываются на изгиб. Часть образцов хранится в естественных условиях для проверки значений усадки и прочности изделий без термовлажностной обработки.

Метод определения усадки при высыхании

Образцы-балочки 40x40x160 мм хранились в естественных условиях, и по истечении 14, 28, 56 и 112 суток от начального измерения определялась их длина и масса. Образцы-балочки со стальными реперами собственной разработки представлены на рисунке 10. Для повторного использования реперов, производится их очистка в ацетоне.



Рисунок 10 - Образцы-балочки со стальными реперами

Согласно ГОСТ 25485 образцы-балочки 40x40x160 мм помещаются в эксикатор над безводным карбонатом калия для определения изменения длины и массы [19, 20, 48].

Выводы по второй главе:

1. В соответствии с требованиями к сырьевым материалам для производства неавтоклавного фибропенобетона, исходя из их доступности в регионе, были выбраны требуемые компоненты. Для сокращения усадочных деформаций применяются два вида наполнителей разной крупности. Модуль упругости армирующих волокон выше модуля упругости ячеистого бетона.

2. Определен рабочий состав и методика изготовления образцов. Разработана технология приготовления фибропенобетона на лабораторной установке, которая состоит из пенобетоносмесителя и пеногенератора.

3. Представлена методика измерения усадочных деформаций образцов-балочек 40x40x160 мм с применением электронно-цифрового индикатора.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ НА УСАДКУ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

3.1 Определение оптимального состава исходного бетона с возможно минимальной величиной усадки

С целью определения оптимального состава пенобетона с минимальными усадочными деформациями были произведены предварительные испытания различных сырьевых составов.

Влияние содержания вяжущего вещества на усадочные деформации

В ходе проведения эксперимента были изготовлены стандартные образцы пенобетона и фибропенобетона для испытаний на прочность при сжатии и определения усадки при высыхании. Образцы № 1.1-1.6 запроектированы для изучения влияния содержания портландцемента и фибры в пенобетоне плотностью 1200 кг/м^3 на усадочные деформации. В качестве порообразующего вещества применялся 6 % раствор белкового пенообразователя *Laston*. Плотность пены 120 г/л. Составы смесей и результаты испытаний образцов приведены в таблице 6. График изменения деформаций усадки образцов во времени представлен на рисунке 11.

Таблица 6 - Составы смесей и результаты испытаний образцов

№ п\п	Цемент, кг/м^3	Песок, кг/м^3	МП-1, кг/м^3	Фибра, % об.	В/Т	Средняя плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа
1.1	330	460	290	0	0,24	1185	3,5
1.2	330	460	290	0,1	0,24	1175	4,1
1.3	330	460	290	0,2	0,24	1170	3,8
1.4	350	460	270	0	0,26	1150	3,2
1.5	350	460	270	0,1	0,26	1160	4,3
1.6	350	460	270	0,2	0,26	1215	4,4

Образцы без фибры (№ 1.1 и 1.4) прогнозируемо показали наибольшие деформации усадки. Образцы № 1.3 и 1.6 с содержанием цемента 330 и 350 кг и 0,2 % фибры по массе отличаются меньшими усадочными деформациями по сравнению с остальными составами фибропенобетона плотностью 1200 кг/м³. При этом фибровое армирование позволяет сократить усадку фибропенобетона даже при высоком содержании цемента. На основании испытаний серии образцов можно сделать вывод о снижении усадочных деформаций неавтоклавного пенобетона при увеличении содержания фибры по массе и сокращении расхода цемента.

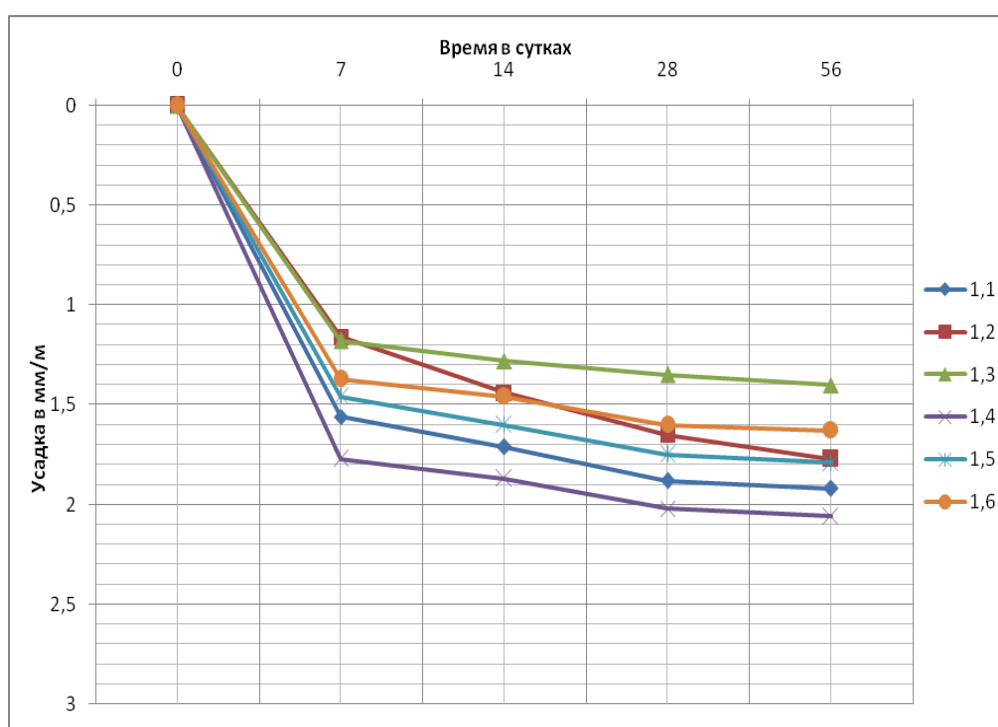


Рисунок 11 - График изменения деформаций усадки образцов во времени

Влияние наполнителей на усадочные деформации

Были запроектированы образцы пенобетона плотностью 1200 кг/м³ с различным содержанием песка и минерального порошка (МП-1). В качестве армирующей добавки использовалась полипропиленовая фибра содержанием 0,1% по объему. Составы смесей и результаты испытаний образцов приведены в таблице 7. График изменения деформаций усадки образцов во времени представлен на рисунке 12.

Таблица 7 - Составы смесей и результаты испытаний образцов

№ п\п	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	МП-1, кг/м ³	Фибра, % об.	В/Т	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
2.1	350	140	600	0,1	0,28	1254	5,7
2.2	350	370	370	0,1	0,24	1260	5,4
2.3	350	500	240	0,1	0,22	1294	5,0
2.4	350	600	140	0,1	0,19	1380	6,4

На основании испытаний серии образцов можно сделать вывод о наименьших усадочных деформациях образцов с минимальным содержанием минерального порошка. В данном случае трудно добиться требуемой плотности вследствие частичной осадки пенобетонной смеси. При увеличении содержания песка и уменьшении водотвердого отношения в сырьевой смеси, деформации усадки пенобетонных образцов понижаются.

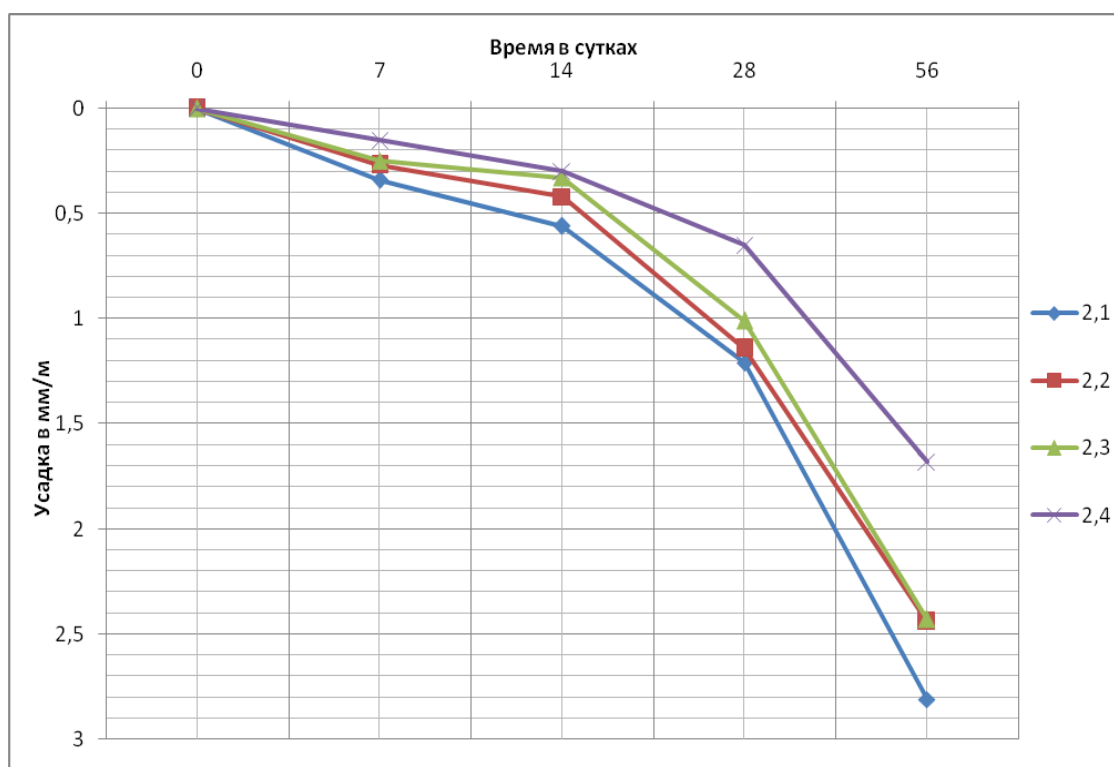


Рисунок 12 - График изменения деформаций усадки образцов во времени

Влияние пенообразователя на усадочные деформации

Были изготовлены стандартные образцы пенобетона плотностью 1200 кг/м³ на основе различных пенообразователей для испытаний на прочность при сжатии

и определения усадки при высыхании. Фибра не вводилась в пенобетонную смесь. Сырьевые составы и результаты испытаний образцов приведены в таблице 8. График изменения усадочных деформаций образцов во времени представлен на рисунке 13.

Таблица 8 - Сырьевые составы и результаты испытаний образцов

Пенообр.	ПЦ, кг/м ³	Песок, кг/м ³	МП-1, кг/м ³	В/Т	Плотность пены, г/л	Рабочий р-р, %	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
ПБ - 2012	300	480	300	0,23	100	1	1202	4,6
<i>Laston</i>	300	480	300	0,24	120	6	1185	3,5
<i>GreenFroth</i>	300	480	300	0,26	80	5	1216	4,4
<i>Reniment SB31L</i>	300	480	300	0,26	75	4	1219	4,5

Усадочные деформации образцов пенобетона на основе пенообразователей *Laston* и *Reniment SB31L* меньше значений *GreenFroth* и ПБ-Формула 2012.

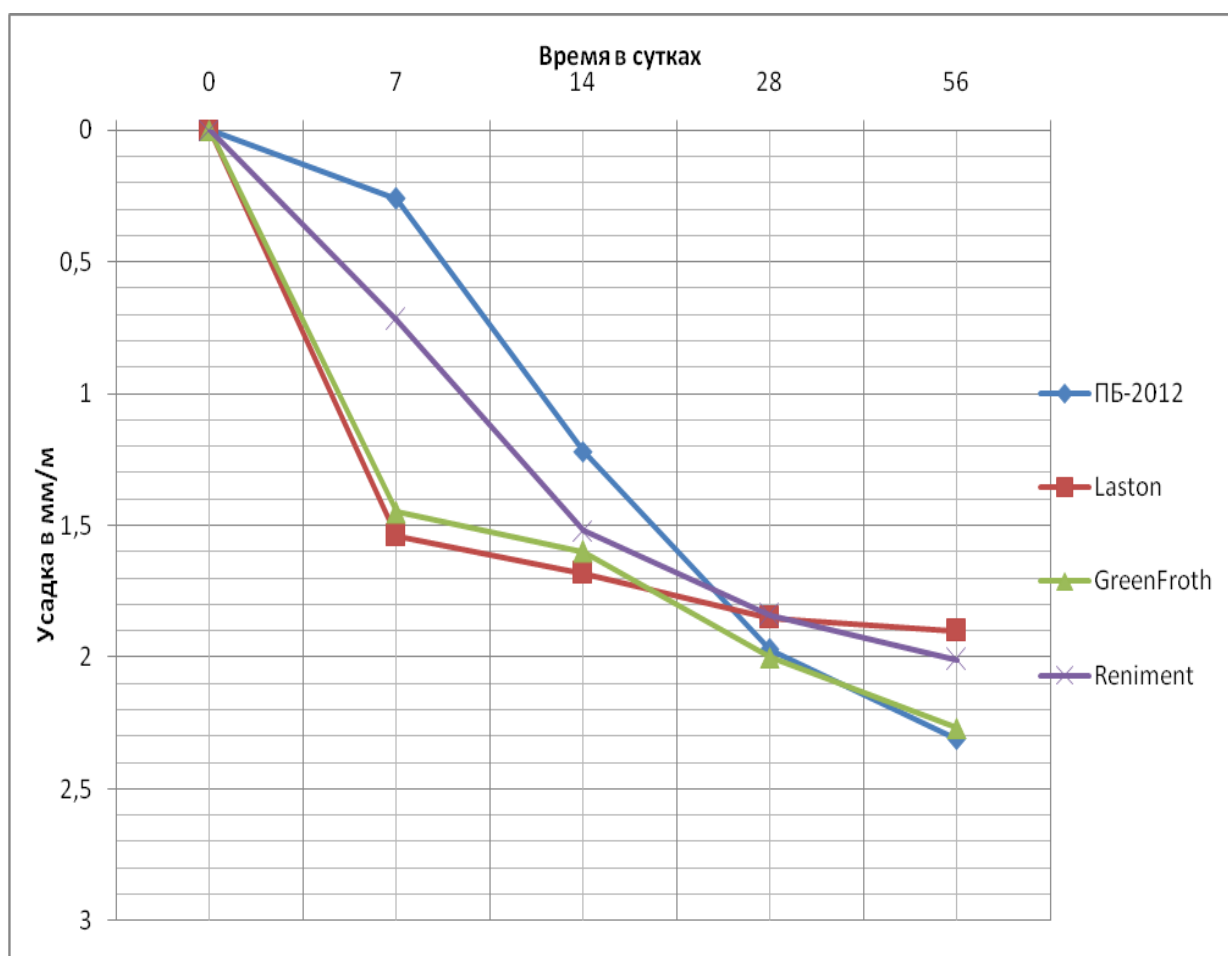


Рисунок 13 - График изменения усадочных деформаций образцов во времени

Для дальнейших исследований был выбран сырьевой состав, характеризующийся минимальным расходом цемента с учетом требуемых прочностных характеристик.

3.2 Теоретические принципы снижения величины усадки ячеистого бетона путем армирования волокнами

Усадке и трещинообразованию, а также процессу развития трещин, препятствуют армирующие волокна, которые должны иметь определенные деформативные характеристики:

$$\varepsilon_{\phi\bar{\sigma}} = \varepsilon_{\bar{\sigma}} \cdot \frac{E_{\bar{\sigma}}}{E_{\bar{\sigma}}(1 - \mu_0) + E_{\phi}\mu_0}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\phi\bar{\sigma}}$ – усадочные деформации фибропенобетона, мм/м;

$\varepsilon_{\bar{\sigma}}$ – усадочные деформации пенобетона, мм/м;

$E_{\bar{\sigma}}$ – модуль упругости ячеистого бетона, МПа;

E_{ϕ} – модуль упругости фибр, МПа;

μ_0 – коэффициент объемного армирования.

В случае полиармирования:

$$E_{\phi} = E_{\phi 1} \cdot k_1 \cdot \mu_0 + E_{\phi 2} \cdot k_2 \cdot \mu_0 + \dots + E_{\phi n} \cdot k_n \cdot \mu_0 = \left(\sum_{i=1}^n E_{\phi i} \cdot k_i \right) \cdot \mu_0, \quad (2)$$

где k – доля i -го вида волокон в общем объеме армирования μ_0 .

Таким образом:

$$\varepsilon_{\phi\bar{\sigma}} = \varepsilon_{\bar{\sigma}} \cdot \frac{E_{\bar{\sigma}}}{\left(\sum_{i=1}^n E_{\phi i} \cdot k_i \right) \cdot \mu_0 + E_{\bar{\sigma}}(1 - \mu_0)}, \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \frac{E_{\bar{\sigma}}}{\left(\sum_{i=1}^n E_{\phi i} \cdot k_i \right) \cdot \mu_0 + E_{\bar{\sigma}}(1 - \mu_0)}. \quad (4)$$

Торможению процесса развития трещин, уменьшению их длины, и, следовательно, усадки способствует степень дисперсности армирования.

Трещины образуются в бетоне, а именно, в материале межпоровых перегородок. Волокна создают пространственный каркас, и чем меньше их диаметр и длина, больше содержание в структуре ячеистого бетона, тем меньше длина трещин. Кроме того, волокна изменяют структуру пористости, в том числе, капиллярной. Делают ее преимущественно замкнутой. Таким образом, усадка уменьшается из-за затруднения испарения капиллярной влаги. Значит усадка – величина, обратная дисперсности армирования, то есть числу волокон в единице объема композита.

Число (шт.) волокон в единице объема:

$$N = \frac{V_e}{V_1} = \frac{\mu_0 \cdot V_{общ}}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot l} = \frac{4\mu_0 \cdot 1}{\pi d^2 \cdot l} = \frac{4\mu_0}{\pi d^2 \cdot l}, \quad (5)$$

где V_e – объем всех волокон, мм³;

V_1 – объем одного волокна, мм³;

$V_{общ}$ – объем смеси, мм³;

d – диаметр волокна, мм;

l – длина волокна, мм.

Усадка фибробетона:

$$\varepsilon_{фб} = \varepsilon_{\delta} \cdot \frac{\pi d^2 \cdot l}{4\mu_0} = \varepsilon_{\delta} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2 \cdot l}{\mu_0}, \quad (6)$$

В случае полиармирования:

$$\varepsilon_{фб} = \varepsilon_{\delta} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[\frac{d_1^2 \cdot l_1 \cdot k_1}{\mu_0} + \frac{d_2^2 \cdot l_2 \cdot k_2}{\mu_0} + \dots + \frac{d_n^2 \cdot l_n \cdot k_n}{\mu_0} \right], \quad (7)$$

$$\varepsilon_{фб} = \varepsilon_{\delta} \cdot \frac{\pi}{4\mu_0} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot l_i \cdot k_i, \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{4\mu_0} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot l_i \cdot k_i, \quad (9)$$

Таким образом:

$$\varepsilon_{фб} = \varepsilon_{\delta} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2. \quad (10)$$

Расчетные зависимости степени снижения усадки с повышением модуля упругости волокон, уменьшением их длины, диаметра представлены на рисунках 14, 15 и 16.

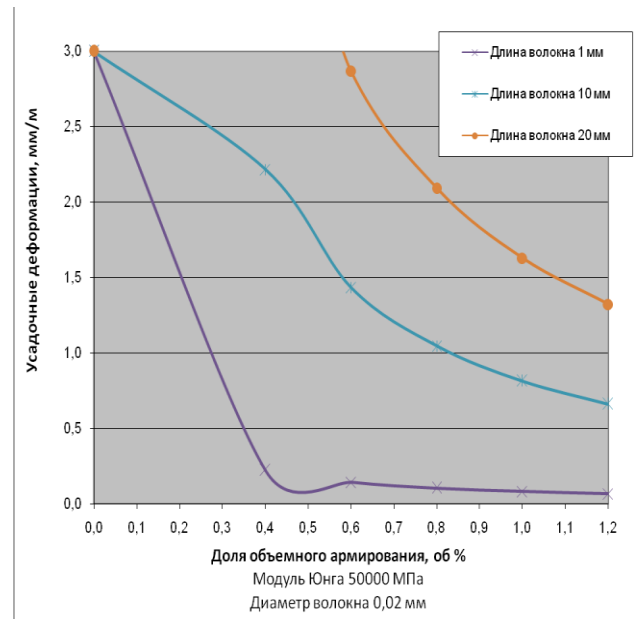
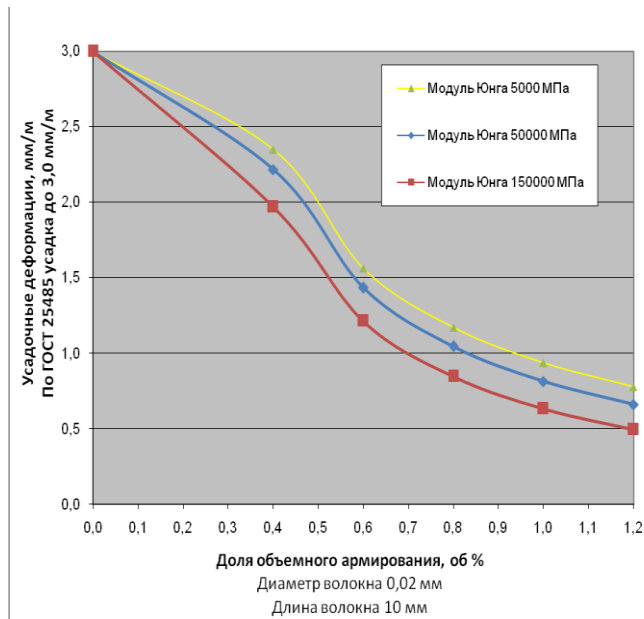


Рисунок 14 – Теоретическая зависимость усадки от модуля упругости волокон

Рисунок 15 – Теоретическая зависимость усадки от длины волокон

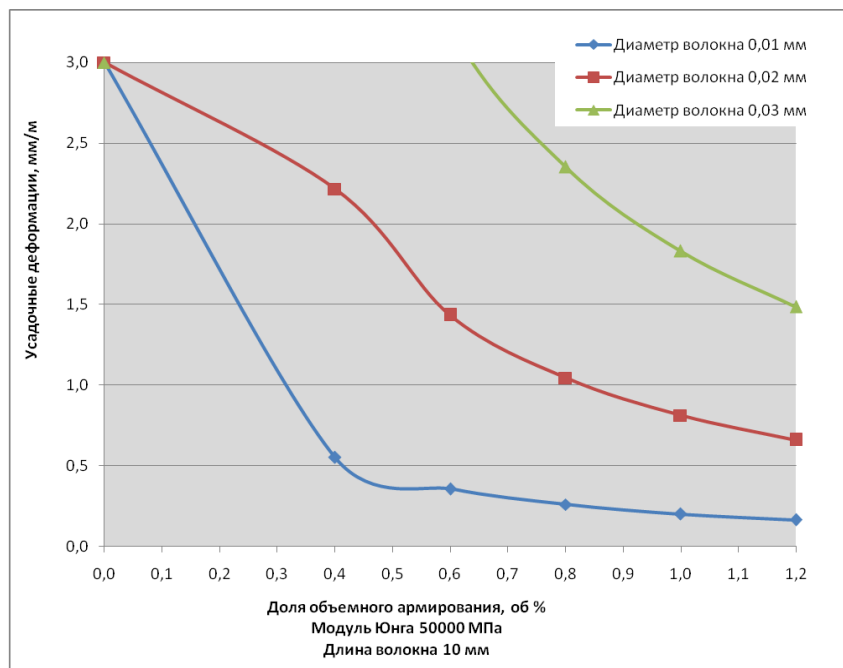


Рисунок 16 – Теоретическая зависимость усадки от диаметра волокон

Исходя из расчетных зависимостей, при доле объемного армирования до 0,6 %, длине фибр и диаметре более 20 мм и 0,03 мм соответственно, расчетная усадка превышает нормативное значение (3 мм/м по ГОСТ 25485).

На основе уравнений 1-10 были построены графики зависимости усадки фибропенобетона от объемного содержания комбинации рассматриваемых волокон. Теоретическая зависимость усадки от объемного содержания комбинации волокон представлена на рисунке 17.

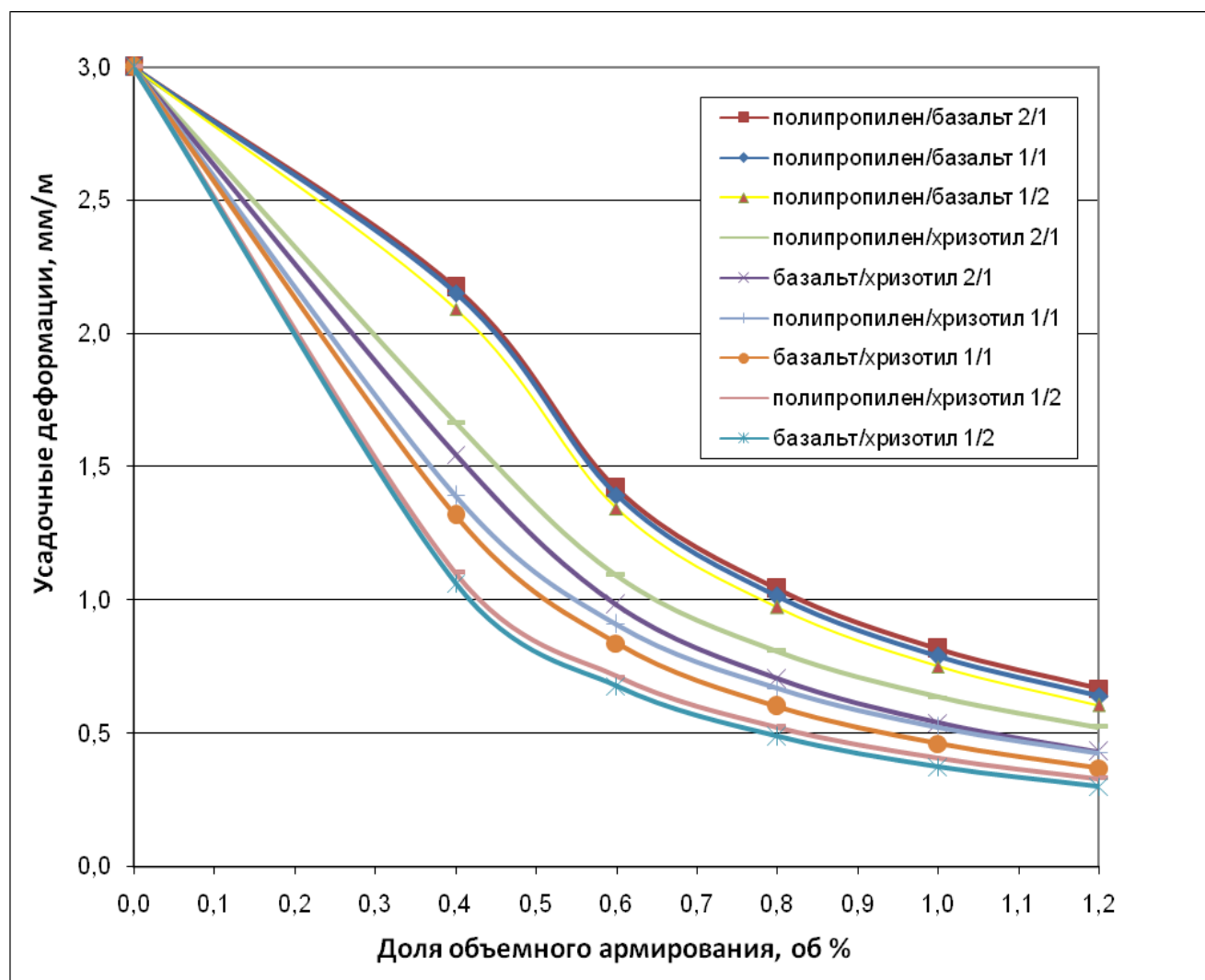


Рисунок 17 – Теоретическая зависимость усадки от объемного содержания комбинации волокон

Исходя из полученной теоретической зависимости, при увеличении доли объемного армирования, усадка фибропенобетона значительно понижается. Наименьшие значения усадки характерны для комбинации базальтовых и хризотилловых волокон в соотношении 1 к 2. Наибольшую усадку в области значений смеси полипропиленовых и базальтовых волокон выражает соотношение 2 к 1.

Таким образом, возможно управление усадочными деформациями и их прогнозирование при изменении комбинации волокон. Наименьшее значение коэффициента α_1 характерно для высокомодульных базальтовых волокон. Хризотилловые волокна отличаются большей дисперсностью, поэтому коэффициент α_2 характеризуется малыми значениями, при увеличении их доли. Хризотилловые волокна и их смесь с полипропиленовыми, базальтовыми фибрами, дает значительное снижение усадочных деформаций.

3.3 Исследование влияния и оптимизация параметров армирования, обеспечивающих повышение прочности, трещиностойкости ячеистого бетона и снижение усадки

Для определения оптимального содержания армирующих волокон в сырьевой смеси фибропенобетона была произведена обработка данных лабораторных исследований.

3.3.1 Влияние различного содержания армирующих волокон на усадочные деформации фибропенобетона

Были изготовлены стандартные образцы моноармированного фибропенобетона плотностью 1200 кг/м^3 с различным содержанием полипропиленовой, базальтовой или хризотилловой фибры для испытаний на прочность при сжатии и при изгибе, определения усадки при высыхании. Серия образцов содержит 0,1, 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 % фибры по объему. Фибра вводилась в готовую пенобетонную смесь. В качестве порообразующего вещества применялся пенообразователь *GreenFroth* (рабочий раствор 5 %). Плотность пены 80 г/л. Составы смесей приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Составы смесей

Усл. об.	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Минеральный порошок, кг/м ³	Фибра, % об.	В/Т	Средняя плотность, кг/м ³
пенобетон без фибры (контрольный состав)						
0	300	480	300	0	0,26	1216
фибропенобетон с полипропиленовым волокном						
0,1	300	480	300	0,1	0,26	1240
0,2				0,2		1181
0,4				0,4		1189
0,6				0,6		1221
0,8				0,8		1405
фибропенобетон с базальтовым волокном						
0,1	300	480	300	0,1	0,26	1222
0,2				0,2		1256
0,4				0,4		1269
0,6				0,6		1234
0,8				0,8		1331
фибропенобетон с хризотилowym волокном						
0,1	300	480	300	0,1	0,26	1248
0,2				0,2		1177
0,4				0,4		1253
0,6				0,6		1255
0,8				0,8		1323

Графики зависимости прочность при сжатии и изгибе от содержания фибры представлены на рисунках 18 и 19.

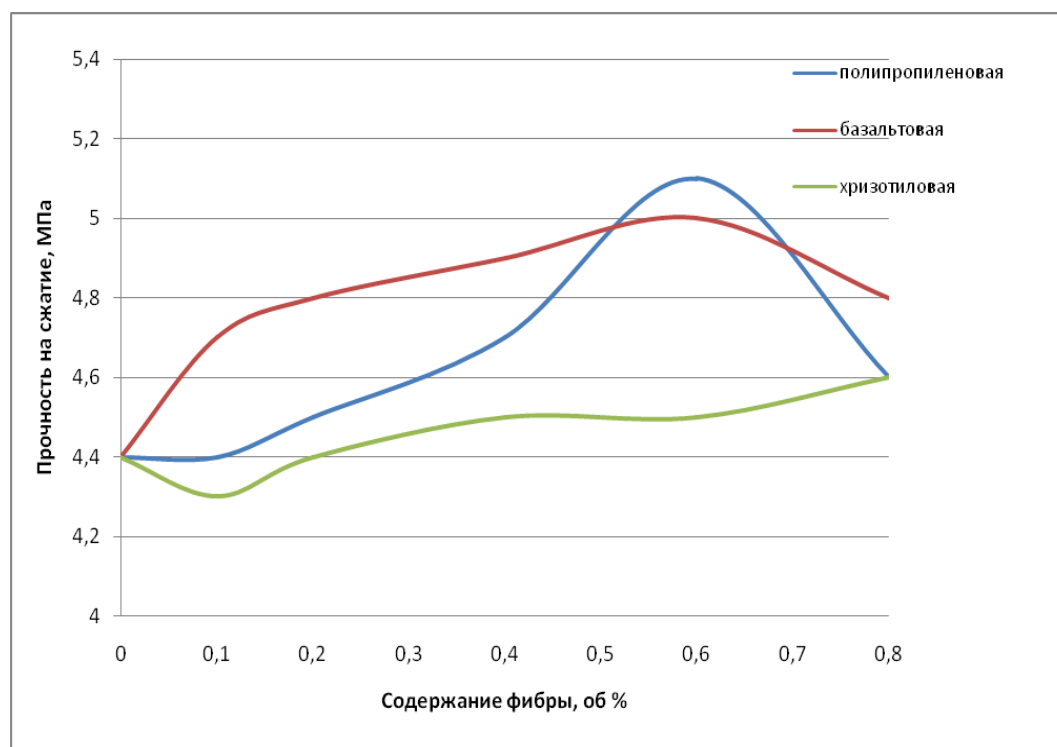


Рисунок 18 - Зависимость прочности на сжатие фибропенобетона от содержания армирующих волокон

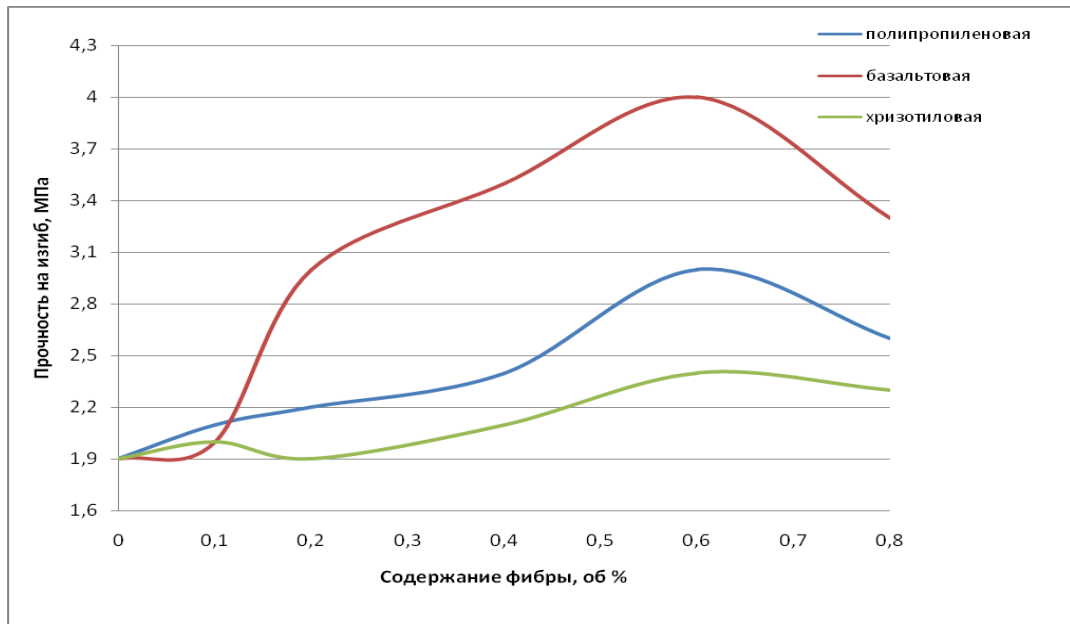


Рисунок 19 - Зависимость прочности на изгиб фибропенобетона от содержания армирующих волокон

На основании испытаний серии моноармированных образцов фибропенобетона можно сделать вывод о незначительном изменении прочности на сжатие. Наблюдается рост прочности при изгибе на 110 % для образца с 0,6 % об. базальтовой фибры. Образцы с полипропиленовой и хризотиловой фиброй характеризуются малым приростом прочности на изгиб.

Графики зависимости усадочных деформаций от содержания полипропиленовой, базальтовой и хризотиловой фибры в возрасте 28 и 112 суток представлены на рисунках 20, 21 и 22.

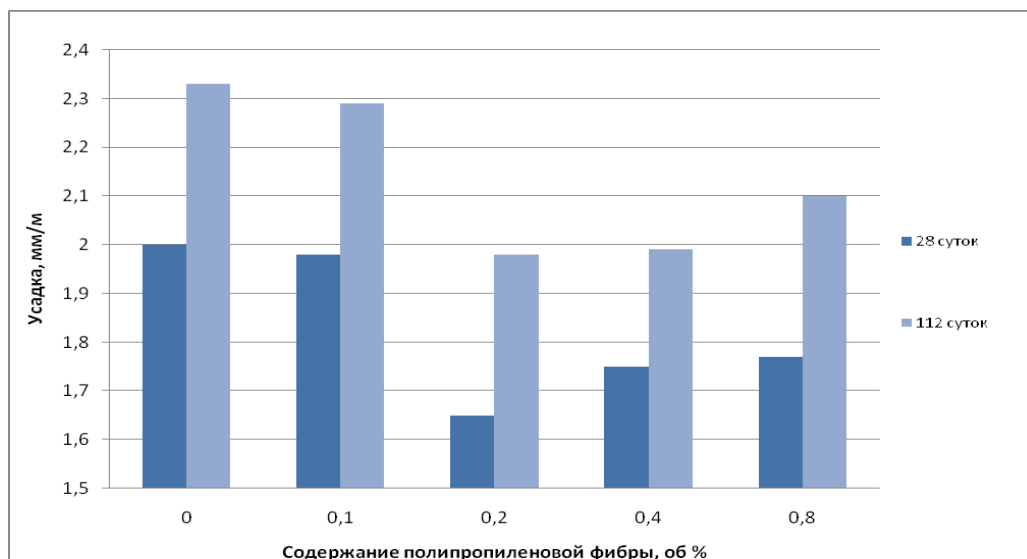


Рисунок 20 - График зависимости усадочных деформаций от содержания фибры в возрасте 28 и 112 суток

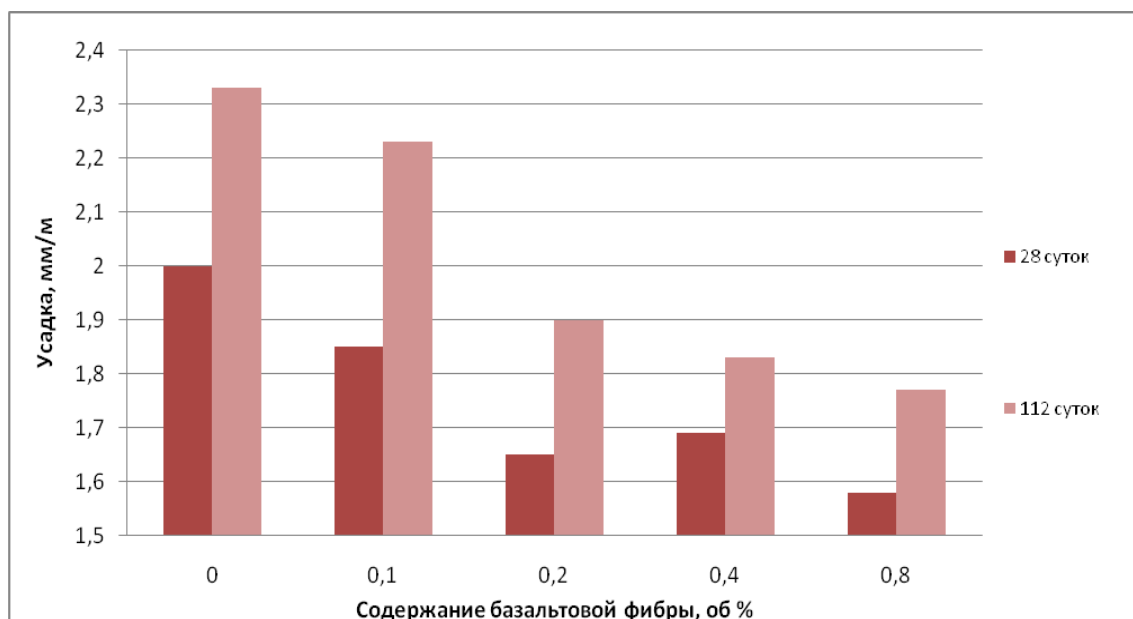


Рисунок 21 - График зависимости усадочных деформаций от содержания фибры в возрасте 28 и 112 суток

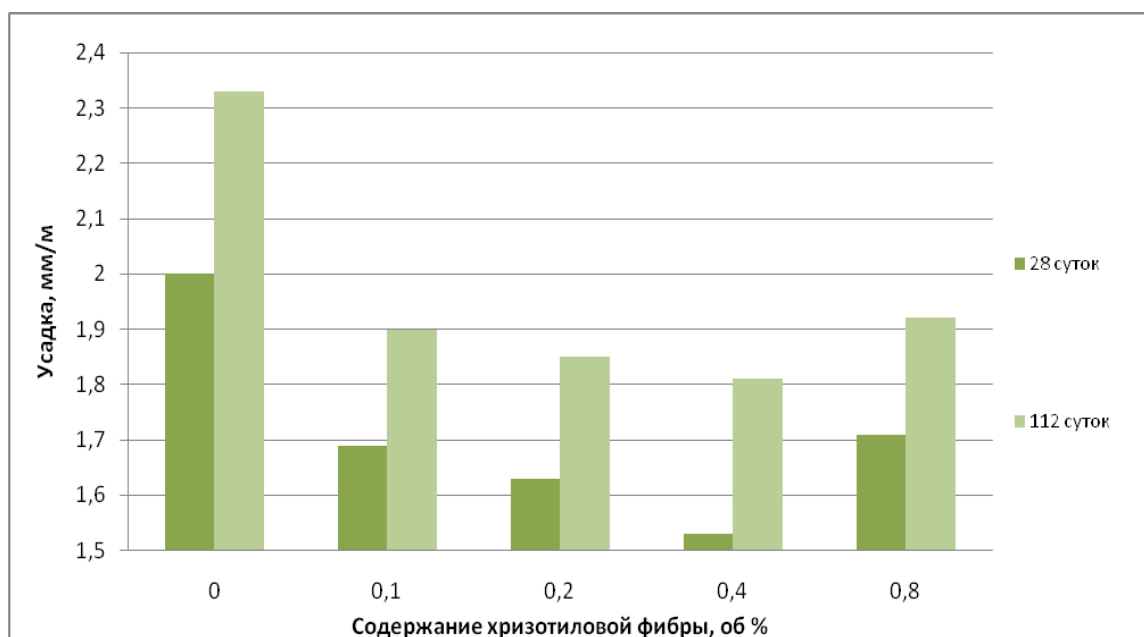


Рисунок 22 - График зависимости усадочных деформаций от содержания фибры в возрасте 28 и 112 суток

Введение полипропиленовой, базальтовой или хризотиловой фибры в сырьевые составы неавтоклавного фибропенобетона приводит к снижению усадочных деформаций на 15-24 %. Образец с содержанием полипропиленовой фибры в количестве 0,2 % об. характеризуется наименьшими усадочными

деформациями, равными 1,98 мм/м. Наименьшими усадочными деформациями среди образцов с базальтовой фиброй отличается состав с 0,8 % волокна по объему (1,77 мм/м), хризотиловой – с 0,4 % волокна по объему (1,81 мм/м). Образцы, армированные высокомодульными волокнами, показали большую эффективность по снижению усадочных деформаций.

Графики изменения усадочных деформаций образцов во времени, армированных полипропиленовой, базальтовой и хризотиловой фиброй, представлены на рисунках 23, 24 и 25.

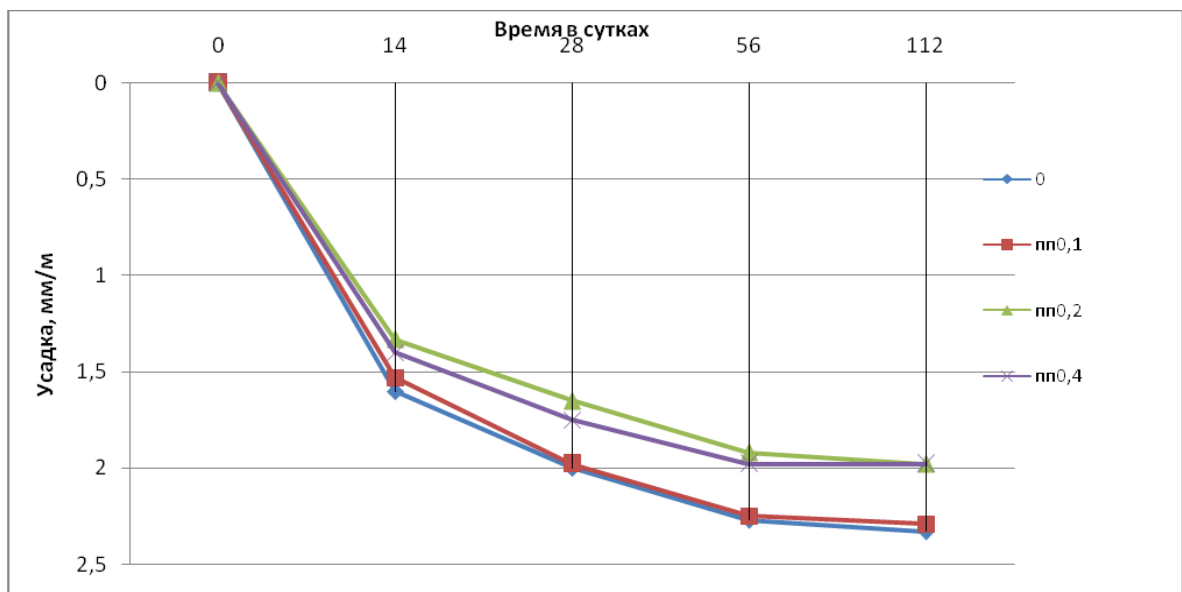


Рисунок 23 - График изменения усадочных деформаций образцов, армированных полипропиленовой фиброй

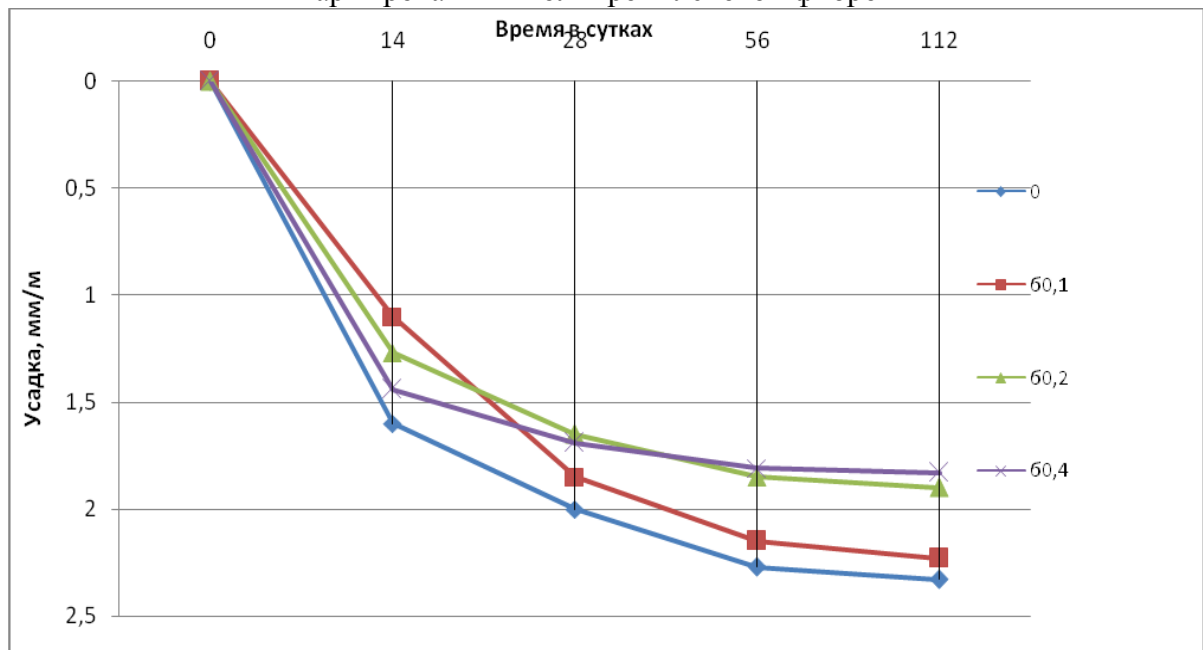


Рисунок 24 - График изменения усадочных деформаций образцов, армированных базальтовой фиброй

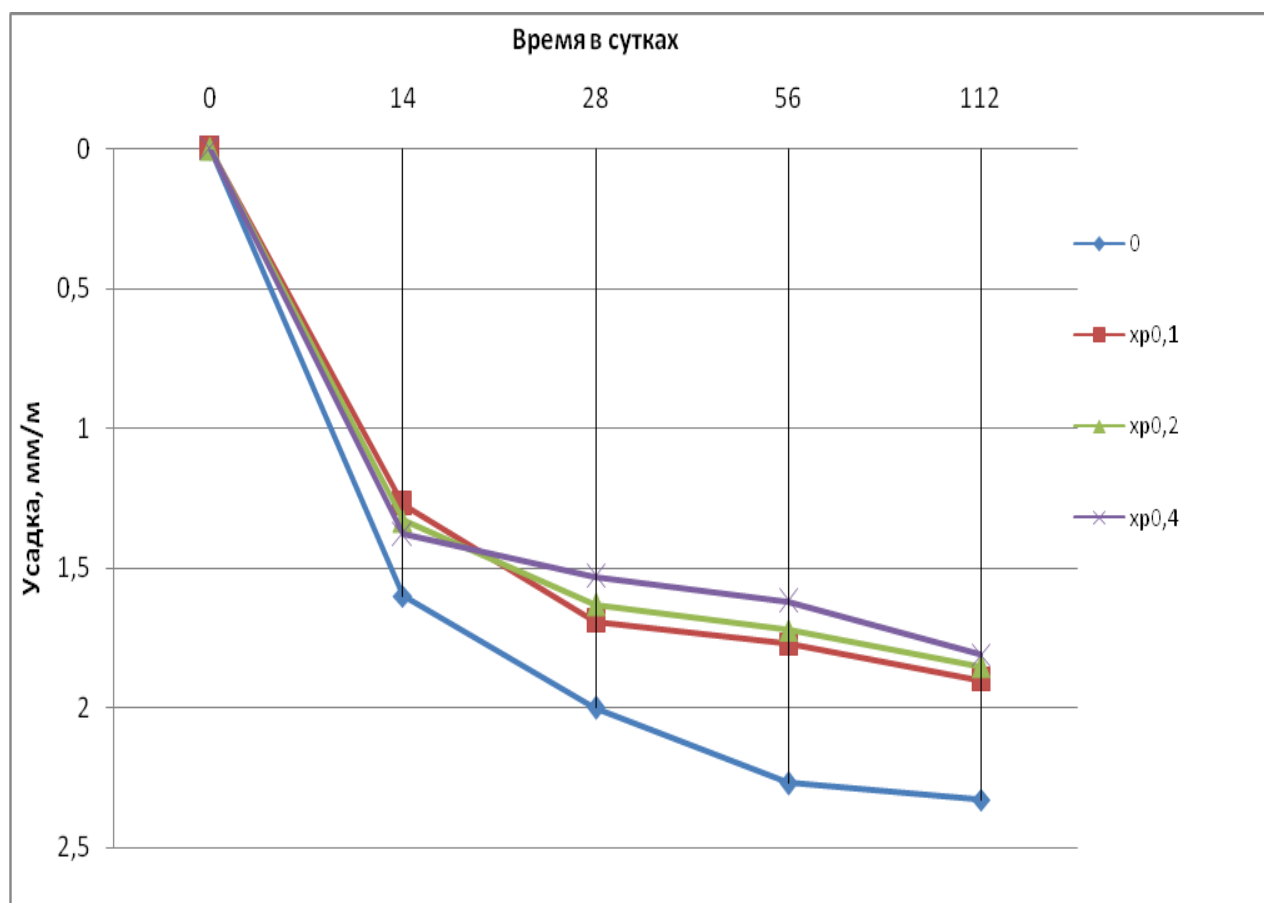


Рисунок 25 - График изменения усуточных деформаций образцов, армированных хризотиловой фиброй

Введение армирующих волокон в количестве более 0,8 % по объему в рамках принятой технологии не позволяет добиться требуемой плотности. Базальтовое волокно с течением времени теряет часть прочности, находясь в среде гидратирующего цемента. Это вызвано взаимодействием с выделяющейся в процессе твердения гидратной известью [5, 6, 12]. Полипропиленовые волокна равномерно распределяются по объему образца и обладают химической стойкостью.

Усадка неавтоклавных пенобетонов после 28 суток продолжается вследствие протекания процессов гидратации цементного камня [50]. После 112 суток хранения в естественных условиях разница в значениях усадки всех образцов фибропенобетона составляет 0,20-0,30 мм/м.

Диаграмма изменения влажности образцов во времени представлена на рисунке 26.

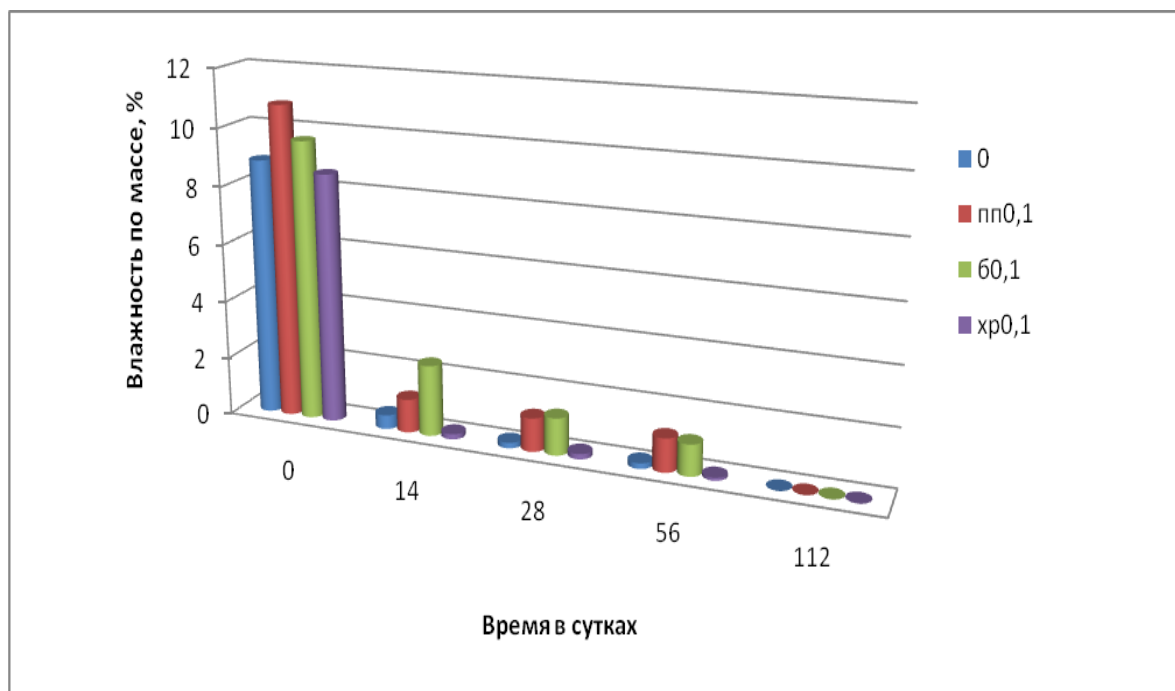


Рисунок 26 - Диаграмма изменения влажности образцов во времени

По истечении первых 14 суток хранения влажность образцов по массе понижается с 11 до 2 %. В это же время фиксируются максимальные усадочные деформации. Затвердевший бетон меняется в объеме за счет изменения влажности в пределах капиллярной системы пор. Движущим источником усадки при высыхании является испарение свободной воды. Сушка происходит с поверхности, которая подвергается воздействию окружающей среды, и это продолжается, если относительная влажность воздуха меньше, чем влажность воздуха в пределах капиллярных пор. Усадка при высыхании может продолжаться в течение нескольких лет в зависимости от свойств бетона [120].

Введение армирующих волокон в сырьевые составы неавтоклавного фибропенобетона предполагает снижение усадочных деформаций и повышение физико-механических характеристик материала. В рамках данного исследования необходимо учитывать комплекс свойств: минимальные усадочные деформации и высокие прочностные характеристики получаемого материала. Совместное армирование различными видами волокон является перспективным направлением исследований.

3.3.2 Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавного твердения. Сравнение значений теоретической и фактической усадки

Низкомодульные и высокомодульные армирующие волокна обладают различными характеристиками: полипропиленовые – повышенной химической стойкостью, базальтовые – высоким модулем упругости, хризотилевое волокно характеризуется высоким сцеплением с цементным камнем. Для сочетания различных характеристик волокон, имеет смысл применение их комбинации. Были изготовлены образцы фибропенобетона плотностью 1200 кг/м^3 , армированные полипропиленовым, базальтовым и хризотилевым волокнами. Полипропиленовые, базальтовые и хризотилевые волокна представлены на рисунках 27, 28 и 29. В качестве порообразующего вещества применялся пенообразователь *Reniment SB31L* (Германия) в концентрации 4%. Плотность пены составляла 75 г/л. Фибра вводилась в воду затворения. Составы смесей и результаты испытаний образцов представлены в таблице 10.



Рисунок 27 - Полипропиленовые волокна



Рисунок 28 - Базальтовые волокна



Рисунок 29 - Хризотилевые волокна

Таблица 10 - Составы смесей и результаты испытаний образцов

№ п/п	Расход компонентов, кг/м ³			Фибра, % об.	В/Т	Свойства		
	Цемент	Песок	МП-1			Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
контрольный состав пенобетона без фибрового армирования								
0	300	480	300	0	0,26	1216	4,4	1,9
полиармированный полипропиленовым и базальтовым волокнами фибропенобетон								
7	300	480	300	0,2 и 0,4	0,26	1207	5,1	3,0
8				0,4 и 0,2		1220	4,8	2,9
9				0,4 и 0,4		1256	5,0	4,3
полиармированный базальтовым и хризотилевым волокнами фибропенобетон								
10	300	480	300	0,4 и 0,2	0,26	1214	4,5	3,7
11				0,2 и 0,4		1238	4,6	2,5
12				0,4 и 0,4		1245	4,4	4,0

График зависимости усадочных деформаций от содержания комбинации армирующих волокон в возрасте 28 и 112 суток представлен на рисунке 30.

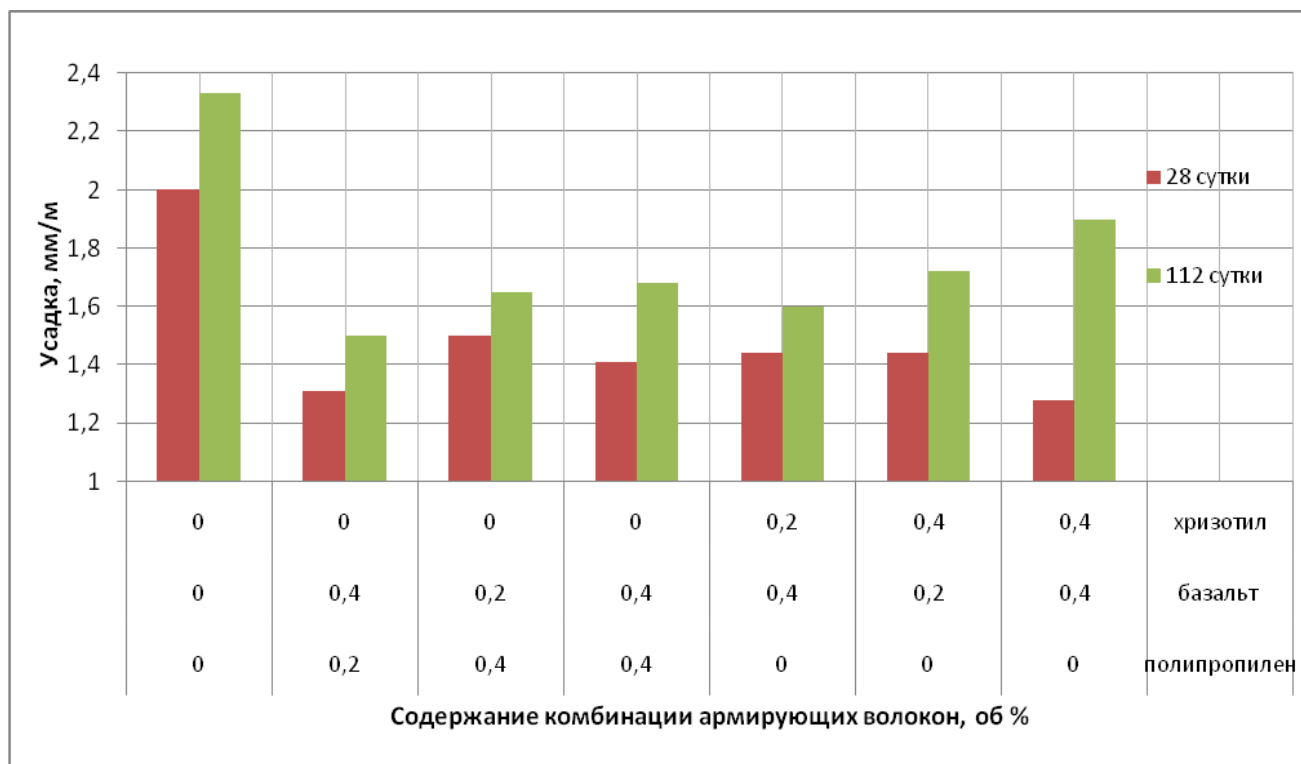


Рисунок 30 - График зависимости усадочных деформаций от содержания комбинации армирующих волокон в возрасте 28 и 112 суток

Наименьшие усадочные деформации характерны для образцов фибропенобетона, армированных полипропиленовой и базальтовой фиброй в количестве 0,2 % и 0,4 % об. соответственно.

В случае полиармирования наблюдается снижение усадки на 36 % по сравнению с образцами без фибрового армирования и на 17 % по сравнению с моноармированным пенобетоном 0,6 % об. базальтовой фибры. Комбинация волокон, при одинаковой объемной концентрации, является более эффективной по сравнению с моноармированными образцами.

Сравнение значений теоретической и фактической усадки

Сравнение значений теоретической и фактической усадки фибропенобетона, армированного комбинацией полипропиленовых и базальтовых волокон представлено в таблице 11 и на рисунке 31.

Таблица 11 – Сравнение значений теоретической и фактической усадки

№ п/п	Наименование	Фибра, % об.	Усадка, мм/м		
			теоретическая	фактическая	теоретическая с поправочным коэффициентом
1	2	3	4	5	5
1	фибропенобетон полиармированный полипропиленовым	0,2 и 0,4	1,35	1,50	1,54
2	и базальтовым волокном	0,4 и 0,2	1,42	1,65	1,62

Отклонение значений теоретической и фактической усадки в области, определенной границами исследования (0,6 %), выражается поправочным коэффициентом, равным 1,14:

$$\varepsilon_{фб} = 1,14 \cdot \varepsilon_{\sigma} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad (11)$$

Для 0,8 % объемного армирования поправочный коэффициент составляет 1,65. Значительное отклонение теоретических значений усадки от фактических обусловлено тем, что при вводе большего количества армирующих волокон

наблюдается образование дефектной структуры. Это, при заданной технологии, может привести к разрушению структуры фибропенобетона и повышению усадки.

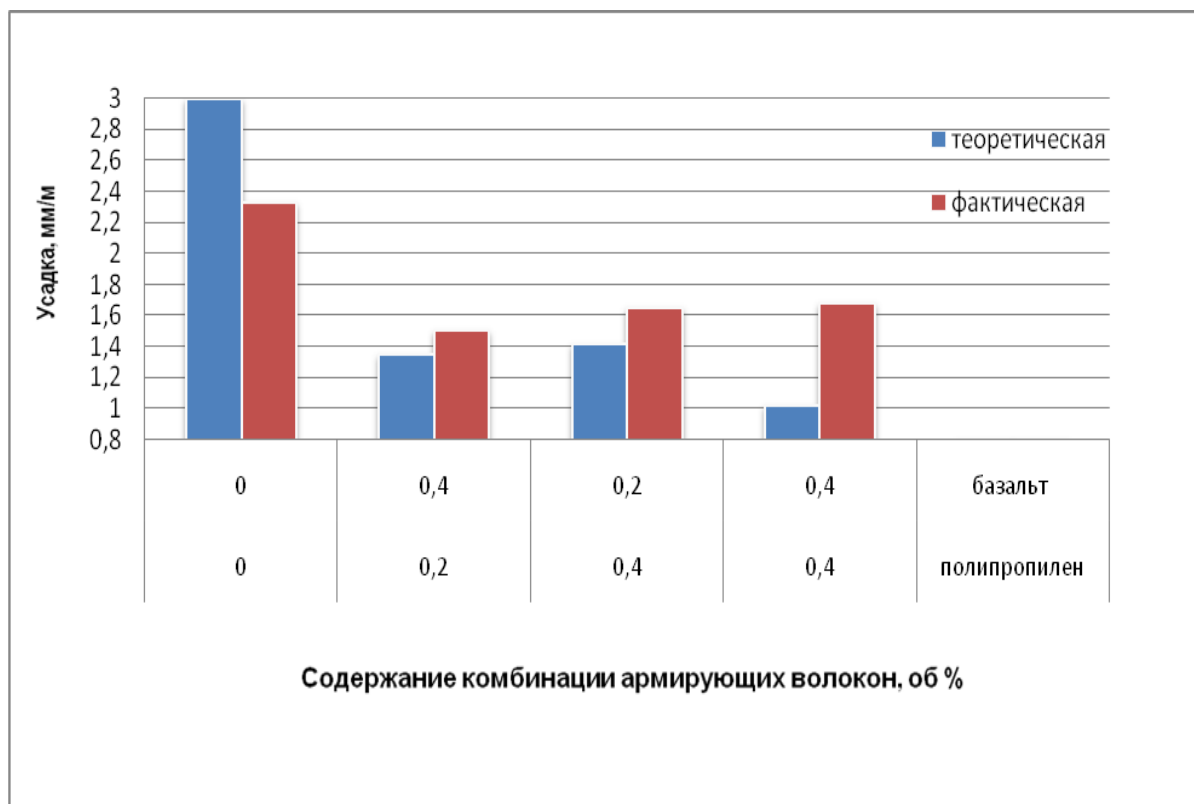


Рисунок 31 – Сравнение значений теоретической и фактической усадки фибропенобетона

3.3.3 Постановка полного факторного эксперимента

Планирование эксперимента - это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения математической модели. Применение этого метода дает возможность значительно повысить эффективность эксперимента. Для получения математического описания процесса пользуются методом полного факторного эксперимента (ПФЭ), который позволяет получить модель, учитывающую влияние связей x - факторов на критерий y или на функцию отклика (параметр оптимизации). При планировании по схеме ПФЭ реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях [1, 34].

Учитывая, что хризотилловые волокна способствуют снижению усадки, для проверки их влияния в составе комбинации и смеси трех видов фибр на усадку был реализован план ПФЭ. Данные, полученные в результате пробных замесов и исследований по подбору оптимальной объемной концентрации армирующих волокон, позволили определить необходимые переменные и уровни варьирования.

Был реализован план полного факторного эксперимента типа 2^3 (с тремя факторами). В качестве варьируемых переменных были приняты: X_1 – содержание полипропиленовой фибры (ПП); X_2 – содержание базальтовой фибры (БЗ); X_3 – содержание хризотилловой фибры (ХР), % по объему. В качестве параметра оптимизации (y) служит значение усадки после 56 суток хранения в естественных условиях, мм/м. Условия проведения полного факторного эксперимента приведены в таблице 12. Матрица планирования 2^3 приведена в таблице 13.

Вывод уравнения регрессии приведен в приложении 3. Расчеты производились с помощью программы *Microsoft Excel*.

В результате реализации плана полного факторного эксперимента получено уравнение регрессии:

$$y = 1,69 - 0,06 \cdot x_1 - 0,11 \cdot x_2 - 0,04 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,13 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (12)$$

где y – усадка после 56 суток хранения, мм/м; x_1 – содержание полипропиленовой фибры; x_2 – содержание базальтовой фибры; x_3 – содержание хризотилловой фибры, % по объему.

График зависимости усадочных деформаций от содержания комбинации фибр, построенный на основе уравнения регрессии, представлен на рисунке 32.

Таблица 12 - Условия проведения полного факторного эксперимента

Характеристика плана	X_1 , ПП	X_2 , БЗ	X_3 , ХР
Основной уровень	0,2	0,3	0,3
Интервал варьирования	0,1	0,2	0,2
Верхний уровень	0,3	0,5	0,5
Нижний уровень	0,1	0,1	0,1

Таблица 13 - Матрица планирования 2^3

№	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	+	+	+	0,30	0,50	0,50
2	-	+	+	0,10	0,50	0,50
3	+	-	+	0,30	0,10	0,50
4	-	-	+	0,10	0,10	0,50
5	+	+	-	0,30	0,50	0,10
6	-	+	-	0,10	0,50	0,10
7	+	-	-	0,30	0,10	0,10
8	-	-	-	0,10	0,10	0,10

Из анализа уравнения (12) следует, что усадка фибропенобетона зависит от содержания и вида фибры, при этом их сочетание дает разный эффект. Зависимость усадочных деформаций от комбинации армирующих волокон, позволяет отметить общую тенденцию, которая указывает на большую эффективность смеси низкомодульных полипропиленовых и высокомодульных базальтовых волокон. Комбинация базальтовых и хризотилowych фибр, а так же смесь трех видов волокон не позволяет эффективно снижать усадку.

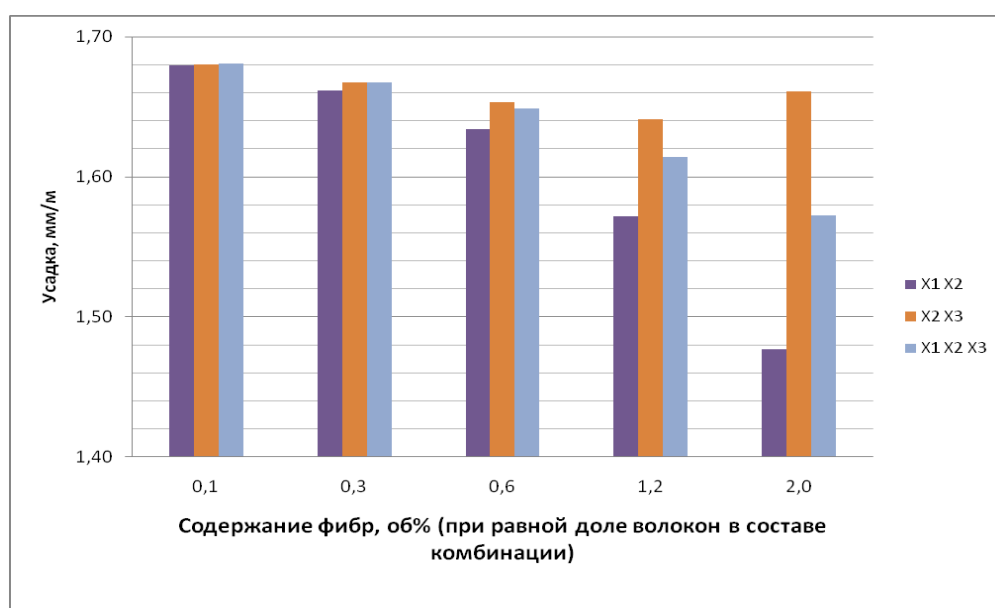


Рисунок 32 - Зависимость усадочных деформаций фибропенобетона от комбинации армирующих волокон

Аналогично было выведено уравнение регрессии для определения математической зависимости прочности на изгиб от содержания армирующих

волокон. В качестве параметра оптимизации (y) служит значение прочности на изгиб, МПа.

Вывод уравнения регрессии приведен в приложении 4. Расчеты производились с помощью программы *Microsoft Excel*.

В результате реализации плана полного факторного эксперимента получено уравнение регрессии:

$$y = 2,79 - 0,07 \cdot x_1 + 0,40 \cdot x_2 + 0,13 \cdot x_3 - 0,61 \cdot x_1 x_2 - 0,26 \cdot x_2 x_3 - 0,30 \cdot x_1 x_2 x_3. \quad (13)$$

где y – прочность на изгиб, МПа.

График зависимости прочности на изгиб от содержания комбинации фибр, построенный на основе уравнения регрессии, представлен на рисунке 33.

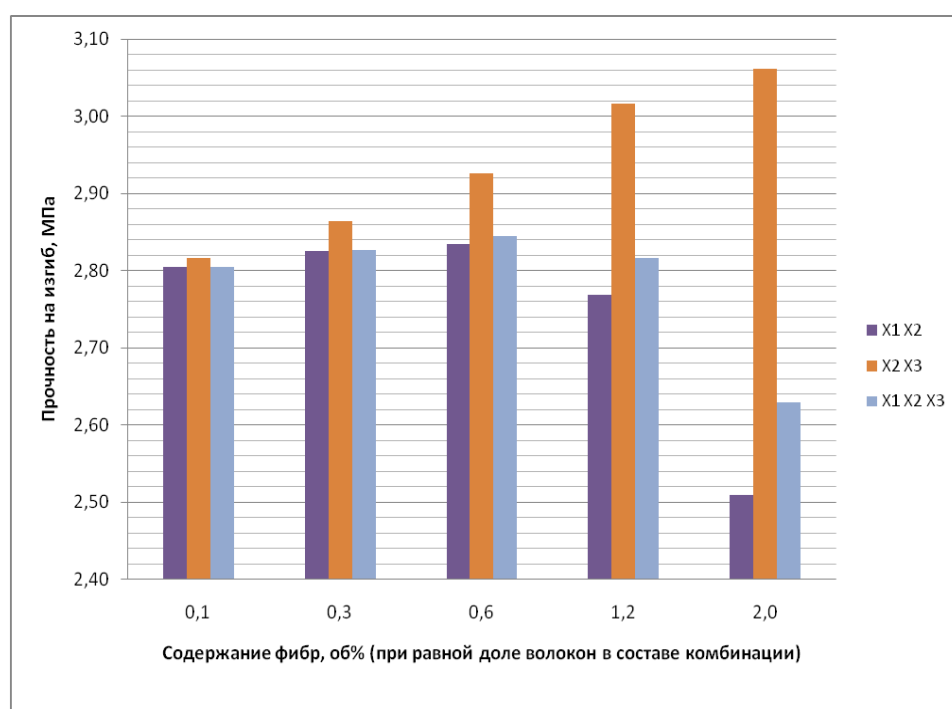


Рисунок 33 - График зависимости прочности на изгиб от содержания комбинации фибр, построенный на основе уравнения регрессии

Для повышения прочности на изгиб в сырьевую смесь следует вводить смесь базальтовых и хризотилловых волокон, но усадочные деформации данной комбинации превышают значения других вариантов армирования. В комплексе, наименьшие усадочные деформации и высокая прочность на изгиб характерны для смеси полипропиленовых и базальтовых волокон.

Для нахождения оптимальной комбинации волокон были построены графики зависимости усадки от различного содержания фибр при постоянном значении одной составляющей комбинации и переменной другой (рисунок 34).

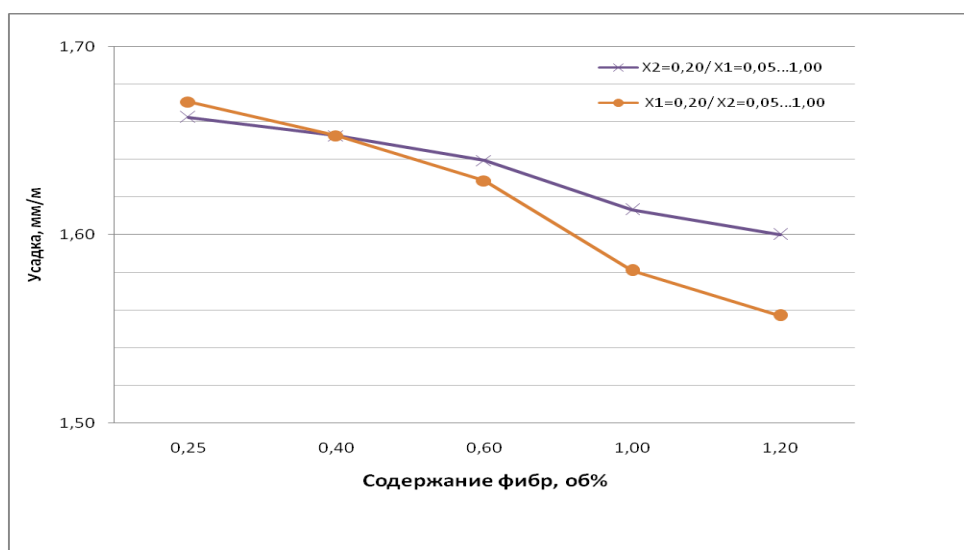


Рисунок 34 – Сравнение значений усадки по уравнению регрессии при различном соотношении волокон

Полученные по уравнению регрессии значения усадки минимальны при содержании полипропиленовых волокон 0,2 % и базальтовых от 0,05 до 1,00 % (0,05; 0,20; 0,40; 0,80; 1,00). Для комбинации фибр 0,2 % и 0,4 % значение усадки по уравнению регрессии составляет 1,63 мм/м. При большем содержании волокон технология проведения экспериментальных исследований не позволяет добиться ввода требуемого количества армирующих волокон в сырьевую смесь с условием получения заданной плотности.

Выводы по третьей главе:

1. Были произведены предварительные испытания и выбран сырьевой состав, характеризующийся пониженным расходом цемента с учетом требуемых прочностных характеристик.
2. В результате теоретических исследований установлено, что при дисперсном армировании пенобетона одновременно несколькими видами волокон

с различными размерами и деформационными характеристиками достигается снижение усадочных деформаций.

3. Предложена математическая модель, определяющая зависимость усадки ячеистого бетона от деформационных свойств волокон и степени дисперсности армирования.

4. Установлено, что введение в состав пенобетона комбинации волокон приводит к снижению усадочных деформаций на 17 % по сравнению с моноармированными образцами и на 36 % по сравнению с пенобетоном без фибрового армирования.

5. Получены уравнения регрессии, позволившие определить оптимальное соотношение армирующих волокон. Наименьшие усадочные деформации характерны для образцов фибропенобетона, армированных смесью низко модульных полипропиленовых и высоко модульных базальтовых фибр в количестве 0,2 и 0,4 % об. соответственно.

ГЛАВА 4 ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА С ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКОЙ

Исходя из положительных результатов диссертационных исследований были выпущены опытно-промышленные партии пазогребневых плит из неавтоклавного фибропенобетона на заводе ООО «Декор-Строй» (г. Старая Русса). Получены акты о выпуске опытных партий общим объемом 10 м³. Акты внедрения представлены в приложениях 5, 6. Разработаны технические условия (ТУ) на изделия стеновые фибропенобетонные. ТУ представлены в приложении 7. На заводе производятся перегородочные плиты размером 600x300x80 мм из неавтоклавного фибропенобетона плотностью 1200 кг/м³. Пазогребневая плита фибропенобетонная и вид пазогребневого соединения представлены на рисунках 35, 36. Физико-механические свойства пазогребневых плит приведены в таблице 14.

Во время исследований на базе завода по производству неавтоклавного фибропенобетона использовались следующие материалы: портландцемент Сланцевского цементного завода ЦЕМ I 42,5 Н; минеральный порошок МП-1 (неактивированный) Угловского известкового комбината; песок речной; протеиновый пенообразователь «Laston» (Италия); полипропиленовые и базальтовые волокна длиной 12 мм.



Рисунок 35 - Пазогребневая плита фибропенобетонная

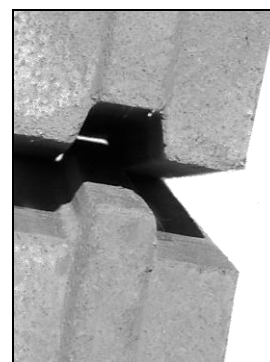


Рисунок 36 - Вид пазогребневого соединения

Таблица 14 - Физико-механические свойства пазогребневых плит

Показатели	Значения
Размеры, мм	600x300x80
Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ³ , не более	1200
Класс бетона по прочности на сжатие, не менее	В 2,5
Марка по морозостойкости, не менее	F 25
Индекс изоляции воздушного шума, Дб, не менее	43
Водостойкость	0,9
Отпускная влажность, %, не более	25
Горючесть	НГ

4.1 Технология производства неавтоклавного фибропенобетона

Организовано серийное производство полиармированного фибропенобетона. Технологической особенностью является введение дополнительного вида волокон. Производство плит из фибропенобетона ведется по неавтоклавной конвейерной технологии. Формы находятся на вагонетках, передвигающихся по специальной железной дороге. Набор прочности происходит в тепловой камере, после чего блоки поступают к распалубочному автомату.

Технологический процесс производства перегородочных плит из фибропенобетона включает следующие этапы:

1. Подготовка исходных материалов
2. Приготовление фибропенобетонной смеси
3. Формование изделий
4. Твердение изделий
5. Сушка
6. Складирование изделий

Приготовление фибропенобетонной смеси осуществляется в установке для производства пенобетона Санни 5, на базе которой построен завод АМЗ (ПБСУ). Песок поступает по ленточному транспортеру. Вода дозируется вместе с песком. Расходные бункера для цемента и МП-1 оснащены шнеками, с помощью которых

сырьевые материалы поступают в установку. Дозирование в автоматизированном заводе Санни-АМЗ производится методом весового мониторинга в соответствии с заданной рецептурой смеси. Фибровые волокна вводятся непосредственно в смеситель при перемешивании сухих компонентов и воды.

Пена поступает в смеситель в течение заданного времени с помощью таймера пеногенератора Фомм-ПГМ. После завершения перемешивания фибропенобетонная смесь через разливочный кран загружается в формы. Процесс от начала перемешивания до разливки смеси по формам длится 10 минут. Схема приготовления фибропенобетонной смеси представлена на рисунке 37.

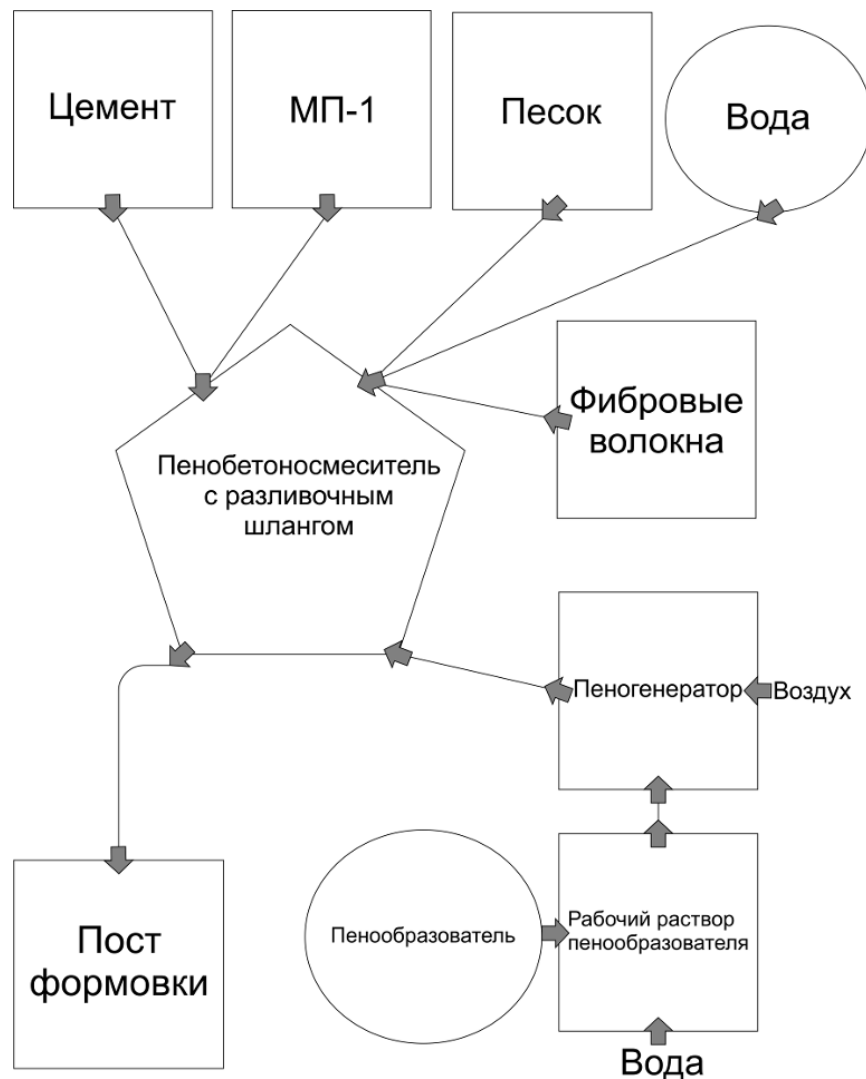


Рисунок 37 - Схема приготовления фибропенобетонной смеси

Подготовка форм производится на посту чистки и смазки. Формование изделий осуществляется литьевым способом через разливочный шланг. В

процессе формования производится проверка средней плотности пенобетонной смеси. Формы находятся на вагонетках, передвигающихся по двухуровневой железной дороге. После заливки формы верхнего уровня происходит сдвиг железной дороги на одну форму и к месту заливки подходит следующая форма. Залитую форму накрывают формообразующими элементами для предотвращения испарения влаги, необходимой для твердения портландцемента и для сохранения нужной геометрии при дальнейшей распалубке. Далее форма, по нижнему уровню железной дороги передвигается в тепловую камеру, представленную на рисунке 38.



Рисунок 38 - Тепловая камера

Процесс чистки и смазки формы и основания занимает 2 минуты, подача смеси в две формы длится 1,5 минуты. С целью ускорения набора распалубочной прочности, твердение фибропенобетонных изделий осуществляется в тепловой камере, которая предназначена для поддержания оптимального режима тепловой обработки (не менее 25 °С).

После набора распалубочной прочности (15 % проектной), изделия поступают в автомат для распалубки форм и укладки плит на поддоны, представленный на рисунке 39. Распалубка проводится через 10 часов. Процесс распалубки нижнего и верхнего ряда плит на поддон занимает 2,5 минуты. Общий вид технологической линии представлен на рисунке 40.



Рисунок 39 - Автомат для распалубки форм



Рисунок 40 - Общий вид технологической линии

Процесс распалубки, движения форм и готовой продукции по железной дороге автоматизирован и управляется промышленным компьютером. Все технологические операции отображаются в режиме реального времени на сенсорном мониторе. Визуальное отображение работы завода на сенсорном мониторе представлено на рисунках 41, 42. Формование фибропенобетонной смеси и распалубка набравших прочность изделий производятся одновременно.

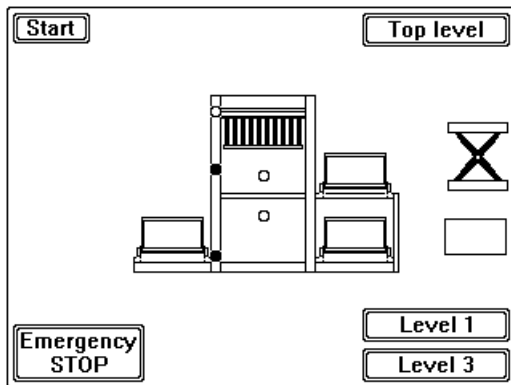


Рисунок 41 - Визуальное отображение работы завода на сенсорном мониторе

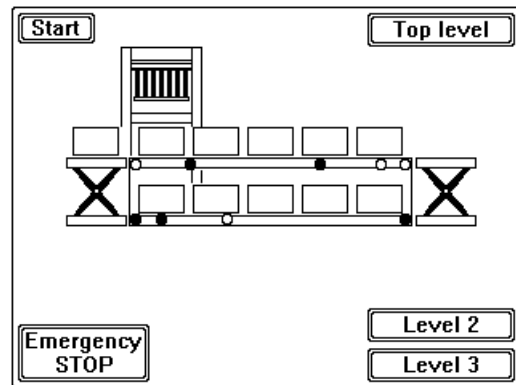


Рисунок 42 - Визуальное отображение работы завода на сенсорном мониторе

После распалубки, поддон с фибропенобетонными плитами передвигается по одноуровневой железной дороге в сушильную камеру. Далее поддон с изделиями закрепляется стальной лентой и обматывается стрейч-пленкой. Упаковка занимает 3 минуты. Схема работы завода представлена на рисунке 43.

Упаковка фибропенобетона в пленку способствует равномерному высыханию материала. Специальные фиксирующие элементы исключают повреждение плит при транспортировке. Поддон с пазогребневыми плитами из

фибропенобетона представлен на рисунке 44. Изделия маркируются в соответствии с их маркой и датой производства. Готовую продукцию вывозят на склад с помощью кран-балки и погрузчика. Складирование готовой продукции представлено на рисунке 45.

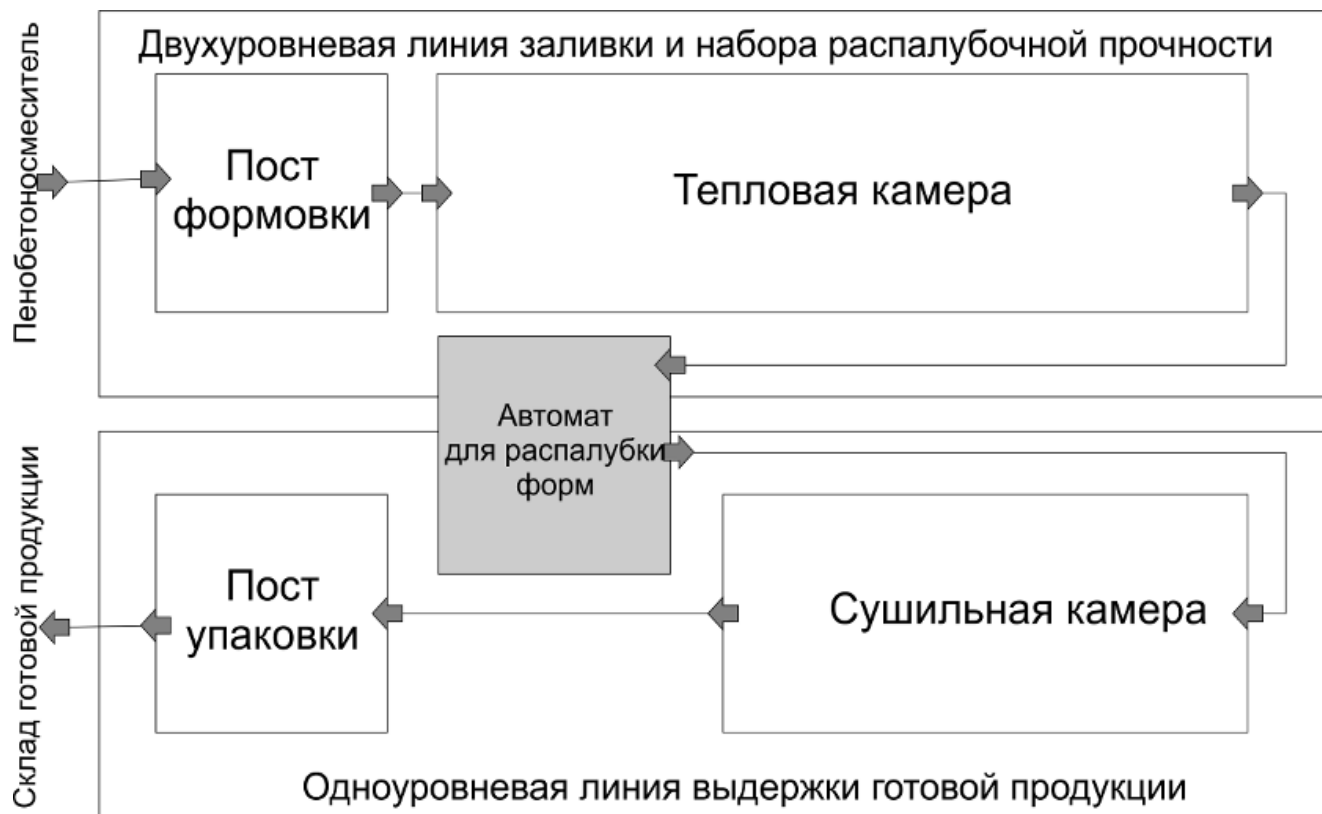


Рисунок 43 - Схема работы завода



Рисунок 44 - Поддон с пазогребневыми плитами из фибропенобетона



Рисунок 45 - Складирование готовой продукции

Для производства фибропенобетона применяется стандартное оборудование. Специальные формы позволяют производить пазогребневые плиты заданных размеров. Основное технологическое оборудование для производства фибропенобетона представлено в таблице 15.

Таблица 15 - Основное технологическое оборудование для производства фибропенобетона

№ п\п	Наименование	Тип (марка)	Характеристика
Мобильный автоматизированный завод АМЗ			
1	Пенобетоносмеситель	Санни 5	Объем: 1,2 м ³
2	Пеногенератор	Фомм-ПГМ	Производительность пены: 500 литров в минуту
3	Компрессор	К-25М	Производительность: 0,55 м ³ /мин
4	Ленточный транспортер (ЛТ)	ЛТ с просеиванием песка	Длина транспортера: 6 м
Распалубочный комплекс Санни 2УЖД-Ф2Р-20			
5	Формы	Форма металлическая	Рабочий объем: 0,5 м ³
6	Конвейер для форм	Железная дорога (ЖД)	Двухуровневая ЖД – по линии формовки; Одноуровневая ЖД – по линии сушки готовой продукции
7	Запаковщик	Запаковщик стрейч-пленкой	Диаметр поворотного стола: 1,5 м

Контроль качества в процессе производства осуществляется в соответствии с картой контроля производства перегородочных плит из фибропенобетона, представленной в приложении 8.

Дозирование фибры в производственных условиях должно осуществляться с достаточной точностью. При проектировании сырьевых составов с пониженным содержанием цемента необходимо учитывать требуемые нормативные прочностные характеристики. Количество цемента в сырьевой смеси должно обеспечивать требуемую прочность на сжатие при минимальной усадке. Достигается это частичной заменой цемента наполнителем. Хранение готовых изделий должно осуществляться с учетом необходимости равномерного их высушивания. Учет всех этих факторов предполагает снижение усадочных деформаций, и, как следствие, повышение качества материала.

Зависимость усадочных деформаций от влажности

С целью определения влияния влажности образцов фибропенобетона на усадочные деформации была проведена статистическая обработка результатов исследований. Исходя из средних значений экспериментальных данных, методом аппроксимации была получена логарифмическая функция, которая характеризует изменение усадки в зависимости от влажности бетона по массе:

$$y = 1,33 - 0,53 \cdot \ln(x) \quad (14)$$

где y – усадка, мм/м;

x – влажность по массе, %.

Зависимость усадочных деформаций образцов от влажности по массе (14) представлена на рисунке 46.

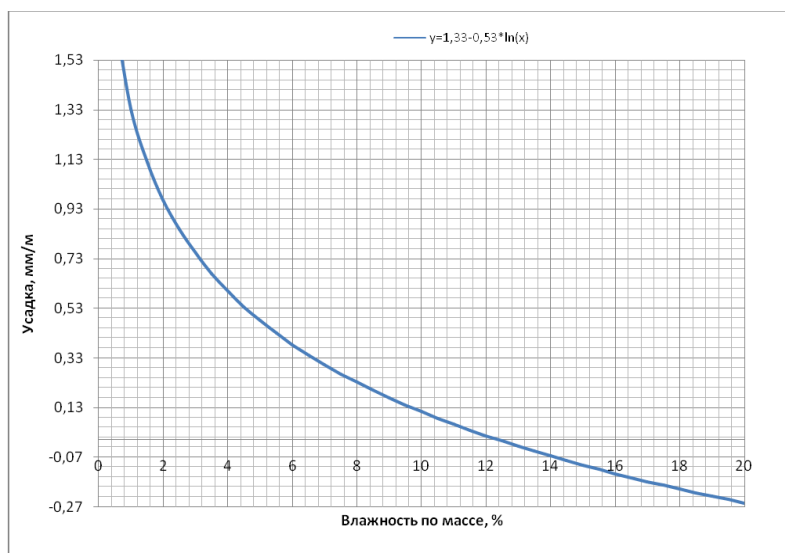


Рисунок 46 - Зависимость усадочных деформаций образцов от влажности по массе

Неавтоклавный пенобетон долгое время набирает прочность, вследствие продолжающейся гидратации цементного камня. При влажности бетона близкой к нулю, наблюдаются малые усадочные деформации. Логарифмическая функция (14) позволяет определить усадочные деформации в заданном промежутке влажности. Данное уравнение может быть использовано в производственных условиях для определения усадочных деформаций по величине влажности по массе.

4.2 Экономическая оценка производства пазогребневых плит

Экономическая оценка производства пазогребневых плит произведена посредством расчёта стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона с различным содержанием комбинации армирующих волокон. Наименования составов приведены в соответствии с объемным содержанием полипропиленовой и базальтовой фибры. Расчёт стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона без минерального порошка (МП-1), представлен в таблице 16.

Таблица 16 - Расчёт стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона без МП-1

Наименование материалов	Ед. изм.	Цена, руб	Состав 0,4/0,4		Состав 0,2/0,4		Состав 0,1/0,2	
			Расход на м ³	Сумма, руб	Расход на м ³	Сумма, руб	Расход на м ³	Сумма, руб
Цемент	т	3500	0,60	2100	0,60	2100	0,60	2100
МП-1	т	850	-	0	-	0	-	0
Песок	т	350	0,48	168	0,48	168	0,48	168
Пенообразователь	л	145	1,50	218	1,50	218	1,50	218
Полипропиленовая фибра	кг	250	3,64	910	1,82	455	0,91	228
Базальтовая фибра	кг	80	11,20	896	11,20	896	5,6	448
			Итого	4292	Итого	3839	Итого	3162

Для снижения стоимости сырьевой смеси $\frac{1}{2}$ часть цемента была заменена минеральным порошком. Расчёт стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона с МП-1, представлен в таблице 17.

Таблица 17 - Расчёт стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона с МП-1

Наименование материалов	Ед. изм.	Цена, руб	Состав 0,4/0,4		Состав 0,2/0,4		Состав 0,1/0,2	
			Расход на м ³	Сумма, руб	Расход на м ³	Сумма, руб	Расход на м ³	Сумма, руб
Цемент	т	3500	0,3	1050	0,3	1050	0,3	1050
МП-1	т	850	0,3	255	0,3	255	0,3	255
Песок	т	350	0,48	168	0,48	168	0,48	168
Пенообразователь	л	145	1,50	218	1,50	218	1,50	218
Полипропиленовая фибра	кг	250	3,64	910	1,82	455	0,91	228
Базальтовая фибра	кг	80	11,20	896	11,20	896	5,6	448
			Итого	3497	Итого	3042	Итого	2367

Замена половины цемента на минеральный порошок, при заданном количестве фибры, привела к снижению стоимости сырьевой смеси:

- ✓ на 19 % для состава 0,4/0,4;
- ✓ на 21 % для состава 0,2/0,4;
- ✓ на 25 % для состава 0,1/0,2.

Средняя стоимость материалов состава 0,1/0,2 является самой низкой и составляет 2367 р/м³. Но данные изделия характеризуются высокими деформациями усадки. Состав 0,2/0,4 отличается оптимальным соотношением требуемых прочностных характеристик и малыми усадочными деформациями, при цене 3042 р/м³. Состав 0,4/0,4 является экономически не целесообразным из-за большого количества фибры и, как следствие, высокой стоимостью (3497 р/м³).

В условиях действующего производства внедрение разработанного состава привело к снижению стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона. Экономическая оценка производства пазогребневых плит произведена посредством расчёта стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона различных составов. Сравнение стоимости материалов представлено в таблице 18.

Таблица 18 - Сравнение стоимости материалов

Наименование материалов	Ед. изм	Цена, руб.	Состав 1*		Состав 2**	
			Расход на м ³	Сумма, руб.	Расход на м ³	Сумма, руб.
Цемент	т	3500	0,475	1662	0,300	1050
Минеральный порошок	т	850	0,205	174	0,300	255
Песок	т	350	0,400	140	0,480	168
Пенообразователь	л	145	1,500	218	1,500	218
Полипропиленовая фибра	кг	250	5,460	1365	1,820	455
Базальтовая фибра	кг	80	-	-	11,200	896
			Итого	3559	Итого	3042

*Состав 1 – применяемый на заводе состав с 0,6 % об. полипропиленовой фибры

**Состав 2 – разработанный состав со смесью полипропиленовых и базальтовых волокон в соотношении 0,2 и 0,4 % об.

Стоимость материалов применяемого на заводе состава с 0,6 % об. полипропиленовой фибры составляет 3559 р/м³, разработанного состава со смесью полипропиленовых и базальтовых волокон в соотношении 0,2 % и 0,4 % об. – 3042 р/м³. Внедрение данного состава привело к снижению стоимости 1 м³ на 14 %. При работе завода в одну смену, годовой выпуск равен 7200 м³ фибропенобетона. Значит, экономический эффект составляет 3722400 руб. в год.

Данный расчет нельзя назвать точным, так как постоянно меняются цены на сырьевые материалы и их доставку. Затраты, связанные с транспортировкой пазогребневых плит, могут оказывать значительное влияние на конечную стоимость изделий.

Исследования, направленные на поиск оптимального объемного содержания фибровых волокон в составе сырьевой смеси, являются актуальными, так как превышение их концентрации ведет к заметному удорожанию изделий. Введение различных видов волокон позволяет добиться лучшего эффекта при заданном объемном содержании волокон, что, в итоге, приводит к снижению затрат.

4.3 Пазогребневые плиты фибропенобетонные в сравнении с другими изделиями для устройства внутренних межкомнатных и межквартирных перегородок

В настоящее время для устройства перегородок между комнатами и квартирами применяются строительные материалы с различными техническими характеристиками. Основные требования к перегородочным материалам изложены в СП 51.13330.2011 «Защита от шума» (актуализированная редакция СНиП 23-03-2003), который предъявляет новые требования к индексу изоляции воздушного шума перегородок в помещениях различного назначения. Например, для перегородок без дверей между комнатами, между кухней и комнатой в квартире, он равен 43 дБ.

Вторым по важности фактором является толщина перегородки. Уменьшение толщины ведет к увеличению полезной площади в помещениях. Например, в квартире площадью 65 м² экономия при возведении перегородок из пазогребневых плит толщиной 80 мм составляет до 3% площади (около 2 м²). При этом должны быть выполнены требования по звукоизоляции, изложенные выше.

На стадии проектирования важен вес будущих перегородок, так как дополнительная нагрузка на перекрытие и фундамент ведет к удорожанию строительства. Материалы для санузлов должны быть водостойкими. В целях обеспечения пожарной безопасности применяются негорючие перегородочные материалы.

Плиты должны иметь ровную поверхность и точные размеры для кладки с минимальным расходом клея. В этом случае поверхность стены будет ровной, что приведет к минимизации штукатурно-отделочных работ. Конечному потребителю важна достаточная звукоизоляция для комфортного проживания. Схематичное расположение перегородок в квартире представлено на рисунке 47.

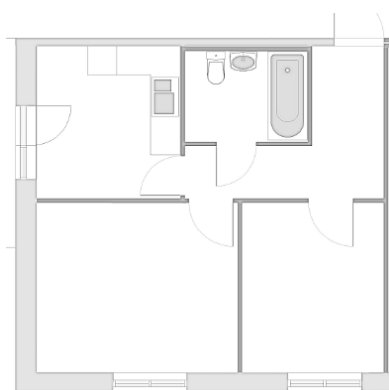


Рисунок 47 - Схематичное
расположение перегородок в квартире

Широкое развитие промышленного и жилищно-гражданского строительства с новыми технологиями монтажа требует применения эффективных звукоизолирующих материалов. Экономически важным является применение строительных материалов, получаемых из недефицитного сырья, обеспечивающего вместе с тем достаточно высокие показатели звукоизоляции при использовании в ограждающих конструкциях. К числу таких материалов

относятся ячеистобетонные материалы. Общим свойством, обуславливающим специфику и выбор вида конструкций из ячеистых бетонов, является содержание значительного количества пор. При наличии пористости существенно улучшаются акустические свойства ячеистых бетонов по сравнению с более плотными материалами. Применение ячеистобетонных материалов в стеновых конструкциях позволяет увеличивать их индекс изоляции по сравнению со стенами из однородных плотных материалов на 2...5 дБ [62].

Были проведены натурные испытания межкомнатных перегородок с целью определения индекса изоляции воздушного шума. Пазогребневые плиты из ячеистого фибробетона плотностью 1200 кг/м^3 соответствуют нормативным требованиям по звукоизоляции межкомнатных и межквартирных перегородок при минимальной толщине стены. Протоколы сертификационных испытаний представлены в приложениях 9 - 11.

Пазогребневые плиты из фибропенобетона характеризуются большим индексом изоляции воздушного шума, чем у гипсовых изделий. Для достижения требуемой звукоизолирующей способности, при заданной плотности газобетона, толщина стены должна быть минимум 150 мм. Керамзитобетонные, бетонные и силикатные перегородочные камни соответствуют требованиям по звукоизоляции при минимальной толщине, но характеризуются большей плотностью, что приводит к нагружению конструкций. Данные изделия, в отличие от фибропенобетонных, трудно обрабатываются и пилятся в процессе монтажа. Гидрофобизированные гипсовые изделия нельзя применять в помещениях с мокрым режимом. Укладка фибропенобетонных, газобетонных и гипсовых перегородок производится на специальный клей, что позволяет добиваться малой толщины швов. Расход клея при этом меньше, чем кладочного раствора. Стоимость фибропенобетонных изделий ниже гидрофобизированных пазогребневых гипсовых плит. Вследствие малой плотности и отсутствия системы паз-гребень цена газобетона меньше. Экономическая эффективность возведения стен из фибропенобетонных пазогребневых плит выше, чем у аналогичных материалов. Данное сравнение нельзя считать точным, так как оптовые цены для

строительных компаний отличаются от представленных на сайтах производителей. Также имеет значение, какой материал указан в проекте и удобен для рабочих бригад, осуществляющих монтаж перегородок.

Сравнительная характеристика изоляции воздушного шума различных типов ограждающих конструкций представлена в таблице 19.

Таблица 19 - Сравнительная характеристика изоляции воздушного шума различных типов ограждающих конструкций

Наименование и расположение ограждающей конструкции	Тип фибропенобетонной перегородки и	Толщина фибропенобетонной перегородки, мм	Индекс изоляции воздушного шума, дБ		Соответствие требованиям СП
			фибропенобетонной перегородки	по СП 51.13330.2011 «Защита от шума»*	
Стены и перегородки между квартирами; между помещениями квартир и офисами; между помещениями квартир и лестничными клетками, холлами, коридорами, вестибюлями	Двухслойная стена с воздушным промежутком	190	53	52	Выше
Перегородки между санузлом и комнатой одной квартиры	Стена с облицовкой плиткой с одной стороны и штукатуркой с другой	110	47	47	Требуемое
Перегородки без дверей между комнатами, между кухней и комнатой в квартире	Стена без штукатурки	80	43	43	Требуемое

Примечание. СП 51.13330.2011 «Защита от шума» (актуализированная редакция СНиП 23-03-2003), табл. 2

Сравнительная характеристика материалов для межкомнатных перегородок представлена в таблице 20. Изделия, представленные в таблице, относятся к негорючим (НГ) строительным материалам. Все характеристики приведены в

соответствии с альбомами решений и техническими условиями производителей перегородок.

Таблица 20 - Сравнительная характеристика материалов для межкомнатных перегородок

Показатели	Пазогребневые плиты фибропенобетонные	Гипсовые пазогребневые плиты гидрофобизированные	Газобетонный прямой перегородочный блок	Камни керамзитобетонные (СКЦ)	Камни перегородочные бетонные (СКЦ)	Блок силикатный межкомнатный полнотелый
Размер изделий, мм	600x300x80	900x300x80	625x250x150	500x188x80	500x188x80	500x250x80
Средняя плотность, кг/м ³	1200	1200	600	1400	1600	1850
Прочность на сжатие, не менее, МПа	3,6	5,0	5,0	6,5	6,5	13,1
Минимальная толщина перегородки, мм	80	80	150	80	80	80
Индекс изоляции воздушного шума, Дб	43	39	43	43	44	43
Масса изделий в 1 м ² перегородки, кг	96,9	99,9	90,2	113,4	134,4	148,0
Монтаж на клей	✓	✓	✓	-	-	-
Сложность обработки	-	-	-	✓	✓	✓
Расход кладочного раствора или клея на 1 м ² перегородки, кг	2,0	2,0	3,7	7,2	7,2	1,4
Стоимость, руб/м ³	5550	8700	3700	5600	5300	7500

На основе представленных данных для устройства внутренних межкомнатных и межквартирных перегородок рекомендуется использование фибропенобетонных пазогребневых плит. Монтаж ведется в соответствии с альбомом технических решений. Основные требования: наличие пробковой звукоизолирующей прослойки между несущими конструкциями и перегородкой; закрепление перегородок к несущим стенам и потолку; укрепление внутренних углов армирующей лентой. Монтаж перегородки и вид стены из пазогребневых плит представлены на рисунках 48, 49.



Рисунок 48 - Монтаж перегородки

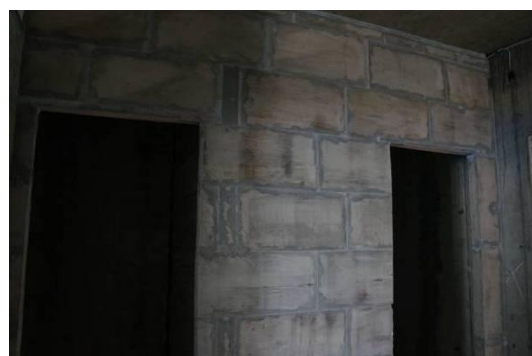


Рисунок 49 - Вид стены из пазогребневых плит

Пазогребневые плиты широко применяются на стройках Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а дальнейшее совершенствование материала приведет к расширению области применения. Жилые дома с перегородками из фибропенобетона представлены на рисунках 50, 51.



Рисунок 50 - Жилые дома с перегородками из фибропенобетона



Рисунок 51 - Жилые дома с перегородками из фибропенобетона

Выводы по четвертой главе:

1. Применение полипропиленовых и базальтовых волокон для изготовления пенобетона при пониженном содержании портландцемента позволяет обеспечить снижение усадки и уменьшение стоимости сырьевой смеси.

2. Выпущена опытно-промышленная партия пазогребневых плит из неавтоклавного фибропенобетона на заводе Декор-Строй. Получено значение индекса изоляции воздушного шума (43 дБ) при толщине стены 80 мм. Разработаны технические условия на стеновые изделия. Внедрен сырьевой состав ячеистого бетона, который характеризуется оптимальным соотношением требуемых прочностных характеристик (прочность на сжатие – 5,1 МПа; на изгиб – 3,0 МПа) и малыми усадочными деформациями (1,5 мм/м). Организовано серийное производство. Экономический эффект составляет 3722400 руб. в год.

3. Получена логарифмическая функция, позволяющая в производственных условиях определять усадочные деформации по величине влажности образцов.

4. Путем сравнительной оценки характеристик различных материалов показана технико-экономическая эффективность предлагаемых в диссертации технических и технологических решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате теоретических исследований установлено, что при дисперсном полиармировании пенобетона одновременно несколькими видами волокон с различными размерами и деформационными характеристиками достигается снижение усадочных деформаций.

2. Предложена рабочая гипотеза и математическая модель, определяющая зависимость усадки ячеистого бетона от деформационных свойств волокон и степени дисперсности армирования. В результате оптимизации установлены границы эффективного армирования композита с учетом принятой технологии, составляющие 0,4-0,8 % фибры по объему. Рабочая гипотеза, заключающаяся в совместной работе высокомодульных и низко модульных армирующих волокон, подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований.

3. Установлено, что введение в состав пенобетона комбинации волокон приводит к снижению усадочных деформаций на 17 % по сравнению с моноармированными образцами и на 36 % по сравнению с пенобетоном без фибрового армирования. При этом эффективность дисперсного полиармирования определяется пределом насыщения бетона волокнами, входящими в состав комбинации, зависит от их свойств и соотношения между ними.

4. Получены уравнения регрессии, позволившие определить оптимальное соотношение армирующих волокон. Разработан состав ячеистого фибробетона, армированный двумя видами волокон. Наименьшие усадочные деформации характерны для образцов фибропенобетона, армированных смесью низко модульных полипропиленовых и высоко модульных базальтовых фибр в количестве 0,2 и 0,4 % об. соответственно. Показано, что применение полипропиленовых и базальтовых волокон для изготовления пенобетона при пониженном содержании портландцемента позволяет обеспечить снижение усадки и уменьшение стоимости сырьевой смеси (заявка на патент № 2015103136 от 30.01.2015 г.).

5. Выпущена опытно-промышленная партия пазогребневых плит из неавтоклавного фибропенобетона на заводе Декор-Строй. Получено значение индекса изоляции воздушного шума (43 дБ) при толщине стены 80 мм. Разработаны технические условия на стеновые изделия. Внедрен сырьевой состав ячеистого бетона, который характеризуется оптимальным соотношением требуемых прочностных характеристик (прочность на сжатие – 5,1 МПа; на изгиб – 3,0 МПа) и малыми усадочными деформациями (1,5 мм/м). Организовано серийное производство. Экономический эффект составляет 3722400 руб. в год.

Перспективы дальнейших исследований:

Планируется совершенствование технологии производства полиармированного неавтоклавного фибропенобетона с целью получения изделий заданной плотности и прочности при дальнейшем снижении величины усадки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука. 1976. – 279 с.
2. Ахундов, А. А. Перспективы совершенствования технологии пенобетона / А. А. Ахундов, В. И. Удачкин // Строительные Материалы. – 2002. – № 3. – С. 10-11.
3. Ахундов, А. А. Пенобетон – эффективный стеновой и теплоизоляционный материал / А. А. Ахундов, Ю. В. Гудков, В. В. Иваницкий // Строительные Материалы. – 1998. – № 1. – С. 9-10.
4. Бабаев, В. Б. Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов / В. Б. Бабаев, В.В. Строкова, В. В. Нелюбова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. – № 4. – С. 58-61.
5. Бабаев, В. Б. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе / В. Б. Бабаев, В.В. Строкова, В. В. Нелюбова, Н. Л. Савгир // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. – № 2. – С. 63-66.
6. Бабаев, В. Б. Термическая обработка базальтового волокна как способ повышения его щелочестойкости / В. Б. Бабаев, В. В. Нелюбова, И. В. Жерновский // Строительные Материалы. – 2013. – № 10. – С. 58-61.
7. Баженов, Ю. М. Технология бетона: учебник / Ю. М. Баженов. – Изд. 3-е, перераб. – М.: АСВ, 2003. – 500 с.
8. Базанов, С. М. Улучшение качества бетона на основе использования смешанных волокон / С. М. Базанов, М. В. Торопова // Популярное бетоноведение. – 2008. – № 7. – С. 73–78.
9. Балмасов, Г. Ф. Пенообразователь FoamСem для ячеистого бетона / Г. Ф. Балмасов, П.И. Мешков // Строительные материалы. – 2006. – № 6. – С. 20-21.

10. Баранов, И.М. Прочность неавтоклавного пенобетона и возможные пути ее повышения / И.М. Баранов // Строительные материалы. – 2008. – № 1. – С. 26-30.
11. Баранова, А. А. Модифицированный теплоизоляционный пенобетон повышенной прочности с применением микрокремнезёма: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Баранова Альбина Алексеевна. – Улан-Удэ, 2014. – 23 с.
12. Боровских, И. В. Повышение долговечности базальтовой фибры в цементных бетонах / И. В. Боровских, Н. М. Морозов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2 (20). – С. 160–165.
13. Бузулуков, В. И. Белковый пенообразователь для пенобетонов / В. И. Бузулуков, В. Д. Черкасов, А. И. Емельянов, Н. П. Сыркина, С. О. Гарцева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2013. – № 7 (655). – С. 23-27.
14. Величко, Е. Г. Рецептурно-технологические проблемы пенобетона / Е.Г. Величко, А. Г. Комар // Строительные Материалы. – 2004. – № 3. – С 26-29.
15. Веселова, С. И. Пенобетон на базе отходов камнедробления / С. И. Веселова, С. А. Черевко, И. О. Суворов // Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2010. – № 4(25). – С. 116–119.
16. Гензлер, М. Н. Пенобетонщик / М. Н. Гензлер, С. А. Линденберг. – Л.: Главная редакция строительной литературы, 1936. – 160 с.
17. Горбач, П. С. Эффективный пенобетон на синтетическом пенообразователе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Горбач Павел Сергеевич. – Улан-Удэ, 2007. – 24 с.
18. ГОСТ 10180-90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 45 с.
19. ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. – М.: Стройиздат, 1981. – 23 с.
20. ГОСТ 25485-89 Бетоны ячеистые. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 22 с.

21. ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 32 с.
22. Граник, Ю. Г. Ячеистый бетон в жилищно-гражданском строительстве/ Ю. Г. Граник // Строительные Материалы. – 2003. – № 3 – С. 2-6.
23. Гусенков, С. А. Теплоизоляционные и стеновые изделия из безавтоклавного пенобетона / С. А. Гусенков, В. И. Удачкин, С. Д. Галкин // Строительные Материалы. – 1999. – № 4. – С. 10-11.
24. Дворкин, Л. И. Практическое бетоноведение в вопросах и ответах / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин, О. М. Бордюженко, Ю. В. Гарницкий, В. В. Житковский – СПб.: Строй-Бетон, 2008. – 328 с.
25. Дворкин, Л. И. Специальные бетоны / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин, – М : Инфра-Инженерия, 2012. – 368 с.
26. Дворкин, Л. И. Проектирование пены при получении поризованных материалов / Л. И. Дворкин, О. В. Безусаяк, И. В. Ковалык // Популярное бетоноведение. – 2010. – № 4. – С. 40-46.
27. Дворкин, Л. И. Неавтоклавный пенобетон с применением гиперпластификатора / Л. И. Дворкин, О. М. Бордюженко // Популярное бетоноведение. – 2008. – №5. – С. 90-94.
28. Елисеева, Н. Н. Пенобетоны неавтоклавного твердения на основе добавок наноразмера: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Елисеева Наталья Николаевна. – СПб., 2010. – 22 с.
29. Завадский, В. Ф. Комплексный подход к решению проблемы теплозащиты стен отапливаемых зданий / В. Ф. Завадский // Строительные Материалы. – 1999. – № 2. – С. 7-8.
30. Зеленков, Д. С. Поризованные бетоны на плотных заполнителях и ячеистые бетоны неавтоклавного твердения с комплексными порообразующими добавками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Зеленков Дмитрий Сергеевич. – Волгоград, 2009. – 26 с.
31. Зоткин, А. Г. Бетон и бетонные конструкции / А. Г. Зоткин. – Р. н/Д: Феникс, 2012. – 335 с.

32. Иванов, В. В. Использование хризотилового волокна в пенобетонах / В. В. Иванов, Н. А. Чемякина // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 265–269.
33. Капуста, М. Н. Повышение эффективности поризованных композитов на основе наноструктурированного вяжущего / М. Н. Капуста, Д. Д. Нецвет, И. А. Дягель, Д. Н. Любимов // Технологии бетонов. – 2013. – № 3. – С. 32-33.
34. Карпов, В. В. Математическая обработка эксперимента и его планирование: учеб. пособие / В. В. Карпов, А. В. Коробейников, В. Ф. Малышев, В. А. Фролькис. – М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПб гос. архит.-строит. ун-т. – СПб., 1998. – 100 С.
35. Кауфман, Б.Н. Производство и применение пенобетона в строительстве / Б.Н. Кауфман. – М.: СтройЦНИЛ, 1940. – 128 с.
36. Кобидзе, Т. Е. Взаимосвязь структуры пены, технологии и свойств получаемого пенобетона / Т. Е. Кобидзе, В. Ф. Коровяков, А. Ю. Кисилев, С. В. Листов // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 178-179.
37. Коломацкий, А. С. Теплоизоляционный пенобетон / А. С. Коломацкий, С. А. Коломацкий // Строительные Материалы. – 2002. – № 3. – С. 18-19.
38. Коломиец, И.В. Аэрированные легкие бетоны и растворы с пористыми заполнителями и их применение в производстве стеновых камней и плит перегородок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Коломиец Иван Васильевич. – СПб., 2003. – 23 с.
39. Коноплев, С. Н. Некоторые вопросы качества пенобетона / С. Н. Коноплев // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 165.
40. Коренькова, С. Ф. Принципы формирования структуры ограждающих конструкций с применением наполненных пенобетонов / С. Ф. Коренькова, В. Ю. Сухов, О. А. Веревкин // Строительные Материалы. – 2000. – № 8. – С. 29-32.
41. Коротышевский, О. В. Новая ресурсосберегающая технология по производству высокоэффективных пенобетонов / О. В. Коротышевский // Строительные Материалы. – 1999. – № 2. – С. 37-38.

42. Краснов, М. В. Ячеистый бетон из мелких отсеков дробления бетонного лома / М. В. Краснов, Ю. Д. Чистов // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 71-74.
43. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона / Лермит Робер ; перевод с фр. В. И. Контовт; [под ред. А. Е. Десова]. – Изд. 4-е. – М.: ЛКИ, 2010. – 296 с.
44. Леснов, В. В. Исследование свойств эпоксидных композитов каркасной структуры, дисперсно-армированных на микро- и макроуровнях / В. В. Леснов, Р. Н. Салимов, В. Т. Ерофеев // Приволжский научный журнал. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. – № 1. – С. 55-61.
45. Леснов, В. В. Исследование свойств цементных композитов, модифицированных поливинилацетатной эмульсией и фиброй «RICEM» для изготовления каркасных бетонов / В. В. Леснов, В. Т. Ерофеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – № 12-2. – С. 3-8.
46. Лещиков, В. А. Современные технологии и оборудование для производства теплоэффективных изделий и конструкций из них / В. А. Лещиков, Т. А. Ухова // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 105-107.
47. Мартыненко, В. А. Резательная технология производства изделий из ячеистого бетона / В. А. Мартыненко, В. В. Ястребцов // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 90-91.
48. Методические рекомендации по исследованию усадки и ползучести бетона / Научно-исследовательский институт бетона и железобетона Госстроя СССР. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1975. - 117 с.
49. Михеенков, М. А. Сравнительная характеристика синтетических и органических пенообразователей / М. А. Михеенков // Популярное бетоноведение. – 2008. – № 3. – С. 51-54.
50. Михеенков, М. А. Активация – путь улучшения свойств неавтоклавного пенобетона / М. А. Михеенков // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 280-282.

51. Моргун, Л. В. Эффективность применения фибропенобетона в современном строительстве / Л. В. Моргун // Строительные Материалы. – 2002. – № 3. – С 16-17.
52. Моргун, Л. В. Теоретическое обоснование и экспериментальная разработка технологии высокопрочных фибропенобетонов / Л. В. Моргун // Строительные материалы. – 2005. – №6. – С. 59 – 63.
53. Моргун, Л. В. Технология производства и применение фибробетона в строительстве / Л. В. Моргун, В. Н. Моргун // Строительные материалы. – 2005. – №8. – С. 34 – 35.
54. Моргун, В. Н. Влияние вида дисперсной арматуры на свойства пенобетонов / В. Н. Моргун, Б. В. Талпа // Строительные материалы. – 2008. – №6. – С. 48 – 49.
55. Моргун, В. Н. Влияние формы компонентов на интенсивность межчастичных взаимодействий в пенобетонных смесях / В. Н. Моргун // Технологии бетонов. – 2009. – №2. – С. 64-66.
56. Моргун, В. Н. Управление свойствами пенобетонов с помощью расширяющих добавок / В. Н. Моргун // Технологии бетонов. – 2009. – № 7-8. – С. 61-63.
57. Моргун, В. Н. О развитии деформаций в фибропенобетоне на основе цементов с расширяющими добавками / В. Н. Моргун // Строительные Материалы. Наука. – 2003. – № 2. – С. 10.
58. Моргун, Л. В. Влияние дисперсного армирования на устойчивость пенобетонов к воздействию огня / Л. В. Моргун, В. Н. Моргун, О. И. Крылова // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 292-293.
59. Моргун, В.Н. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавногo твердения с компенсированной усадкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Моргун Владимир Николаевич. – М., 2005. – 23 с.
60. Овсяков, М. Ю. Технология фибропенобетонов с применением отходов пиления вулканического туфа / М. Ю. Овсяков, А. А. Сухов, Т. А. Хежев //

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Махачкала: ДГТУ, 2015. – № 1. – С. 107-113.

61. Павленко, Н. В. Модифицированное вяжущее с использованием нанокристаллических компонентов для ячеистых композитов / Н. В. Павленко, А. Б. Бухало, В. В. Строкова, В. В. Нелюбова, А. В. Сумин // Строительные Материалы. – 2013. – № 2. – С. 20-25.

62. Пестряков, И. И. Применение ячеистых материалов для изготовления ограждающих конструкций с требуемыми звукоизоляционными свойствами / И. И. Пестряков, В. А. Пинскер, В. П. Вылегжанин // Ячеистые бетоны в современном строительстве. – 2005. – II Международная научно-практическая конференция. Сборник докладов. – С. 46-48.

63. Песцов, В. И. Эффективность применения ячеистых бетонов в строительстве России / В. И. Песцов, К. А. Оцоков, В. П. Вылегжанин, В. А. Пинскер // Строительные Материалы. – 2004. – № 3. – С. 7-8.

64. Петров, С. Д. Ускорение твердения монолитного пенобетона при пониженных и отрицательных температурах / С. Д. Петров, А. В. Хитров, Л. Б. Сватовская // Новые исследования в материаловедении и экологии. – СПб: ПГУПС, 2005. – С. 20-28.

65. Пинскер, В. А. Ленинградская практика строительства из ячеистых бетонов и его нормирование/ В. А. Пинскер, В. П. Вылегжанин // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 30-31.

66. Пинскер, В. А. Сборно-монолитные перекрытия из ячеистобетонных блоков / В. А. Пинскер, В. П. Вылегжанин // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С.130-131.

67. Пинскер, В. А. Нормирование свойств ячеистых бетонов, изделий и конструкций из них / В. А. Пинскер, В. П. Вылегжанин // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 38-39.

68. Попов, К. Н. Строительные материалы и изделия: учебник / К. Н. Попов, М. Б. Каддо. – М.: Высшая школа, 2001. – 367 с.

69. Пухаренко, Ю.В. Коррозионностойкие наномодифицированные цементные бетоны / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова, В.Д. Староверов // Технологии бетонов. – 2010. – № 7– 8 (48– 49). – С. 24-27.
70. Пухаренко, Ю. В. Прочность и долговечность ячеистого фибробетона / Ю. В. Пухаренко // Строительные материалы. – 2004. – №12. – С. 40 – 41.
71. Пухаренко, Ю. В. Проблемы в производстве неавтоклавного пенобетона и их решения / Ю. В. Пухаренко // Популярное бетоноведение. – 2008. – II Международная конференция. Сборник докладов. – С. 104 – 107.
72. Пухаренко, Ю. В. Свойства и перспективы применения ячеистого фибробетона / Ю. В. Пухаренко // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 75-77.
73. Пухаренко, Ю. В. Особенности формирования структуры ячеистого фибробетона / Ю. В. Пухаренко // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 78-82.
74. Пухаренко, Ю. В. Особенности технологии ячеистого фибробетона / Ю. В. Пухаренко // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 194-197.
75. Пухаренко, Ю. В. Технология ячеистых бетонов: методические указания к выполнению лабораторных учебно-исследовательских работ для студентов специальности 290600 – производство строительных материалов, изделий и конструкций / Ю. В. Пухаренко, Ю. В. Кондратьева. – СПб.: СПбГАСУ, 1996. – 27 с.
76. Пушкина, В. В. Пенобетоны неавтоклавного твердения на гипсоглиноземистом расширяющемся цементе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Пушкина Виктория Владимировна. – Р. н/Д., 2010. – 24 с.
77. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов: Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович. – М.: АСВ, 2011. – 646 с.
78. РМД 51-01-2006 Санкт-Петербург. Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением

ячеистых бетонов в Санкт-Петербурге. – СПб: Администрация Санкт-Петербурга, 2006. – Ч. 1. – 26 с.

79. Рыбьев, И. А. Материаловедение в строительстве: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / И. А. Рыбьев, Е. П. Казеннова, Л. Г. Кузнецова, Т. Е. Тихомирова; под ред. И. А. Рыбьева. – 2-е изд., испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 528 с.

80. Савенков, А. И. Проблемы монолитного домостроения из пенобетона в Сибири / А. И. Савенков, С.А. Щербин, П.С. Горбач // Технологии бетонов. – 2008. – № 9. – С. 8-10.

81. Силаенков, Е. С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов / Е. С. Силаенков. – М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.

82. Сеница, М. Влияние структуры поризованного бетона на его деформации и прочность / М. Сеница, А. А. Лаукайтис, А. Дудик // Строительные Материалы. – 2002. – № 11. – С 32-34.

83. Смирнова, П.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности управления величиной усадочных деформаций в пенобетонах неавтоклавного твердения / П.В. Смирнова, Л.В. Моргун, В.Н. Моргун // Строительные материалы. – 2013. – № 4. – С. 96-97.

84. СН 277-80 Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 47 с.

85. Соловьева, В. Я. Особенности получения пенобетона улучшенного качества / В. Я. Соловьева // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 290-291

86. Суворов, О. Ф. Установки «Санни» для производства пенобетона / О. Ф. Суворов // Строительные материалы. – 2005. – № 12. – С. 38.

87. Сычева, А. М. Некоторые особенности сырьевых шихт при получении автоклавного пенобетона по резательной технологии / А. М. Сычева, Д. И. Дробышев, И. П. Филатов // Новые исследования в материаловедении и экологии. – СПб: ПГУПС, 2005. – С. 94-95.

88. Сычева, А. М. Получение и свойства модифицированной пены и пенобетона на ее основе / Сычева А. М., Елисеева Н. Н., Самборский С. А. // Популярное бетоноведение. – 2009. – III Международная конференция. Сборник докладов. – С. 10-13.
89. Сычева, А. М. Повышение трещиностойкости и теплозащитности пенобетонов с использованием полисахаридов / А. М. Сычева // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 287-289.
90. Сычева, А. М. Повышение прочности и теплозащитности пенобетонов с использованием наноструктур / А. М. Сычева // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 298-301.
91. Сычева, А. М. Влияние комплексной добавки, содержащей частицы нано- и наднаноразмера, на качество автоклавного пенобетона / А. М. Сычева, И. П. Филатова, Н. Н. Елисеева, Т. И. Бойкова // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 1. – С. 88-91.
92. Сычева, А. М. Технология производства автоклавного резательного пенобетона / А. М. Сычева, В. Я. Соловьева, А. В. Хитров, В. А. Чернаков // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 3. – С. 120-123.
93. Тейлор, Х. Химия цемента / Х. Тейлор ; перевод с англ. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
94. Удачкин, И. Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона / И. Б. Удачкин // Строительные Материалы. – 2002. – № 3. – С. 8-9.
95. Удачкин, И. Б. Теплосбережение и экология – ключевые направления деятельности инновационного центра / И. Б. Удачкин // Строительные Материалы. – 1999. – № 1. – С. 26-28.
96. Удачкин, В. И. Классическая механоактивация в технологии пенобетона / В. И. Удачкин, В. М. Смирнов, В. Е. Колесников // Строительные материалы. – 2005. – №12. – С. 31-33.
97. Удачкин, В. И. Малоусадочный неавтоклавный пенобетон для сборного и монолитного строительства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Удачкин Вячеслав Игоревич. – М., 2000. – 22 с.

98. Урханова, Л.А. Использование вторичного сырья для производства пенобетона / Л.А. Урханова, С.А. Щербин, А.И. Савенков, П.С. Горбач // Строительные материалы. – 2008. – №1. – С. 34 – 35.
99. Ухова, Т.А. К вопросу о терминологии ячеистых бетонов/ Т.А. Ухова // Строительные Материалы. – 2004. – № 3 – С. 8-9.
100. Ухова, Т. А. Настоящее и будущее ячеистых бетонов в России / Т. А. Ухова // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 13-17.
101. Феклистов, В. Н. К вопросу формирования структуры пенобетона низкой плотности / В. Н. Феклистов, А. К. Абдулин // Строительные Материалы. Наука. – 2003. – № 2. – С.2-3.
102. Филиппов, Е. В. Теплоизоляционный безавтоклавный пенобетон / Е. В. Филиппов, И. Б. Удачкин, О. И. Реутова // Строительные Материалы. – 1997. – № 4 – С. 4-5.
103. Филиппов, Е. В. Выбор направления / Е. В. Филиппов // Строительные Материалы. – 1997. – № 11 – С. 12-15.
104. Хакимова, Э. Ш. Цементный пенобетон с нанодобавками синтетических цеолитов / Э. Ш. Хакимова, Е. А. Волошин, А. С. Королев // Популярное бетоноведение. – 2008. – II Международная конференция. Сборник докладов. – С. 134-138.
105. Хежев, Т. А. Технология и свойства огнезащитных фиброгипсовермикулитобетонных композитов с применением вулканических горных пород / Т. А. Хежев, Г. Н. Хаджишалапов, Х. А. Хежев, Р. М. Курбанов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Махачкала: ДГТУ, 2013. – № 1. – С. 77-83.
106. Черевко, С. А. Неавтоклавный пенобетон на базе отходов камнедробления / С. А. Черевко, И. О. Суворов, К. А. Николаев // Актуальные проблемы современного строительства: 64-я международная научно-техническая конференция молодых ученых. – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2011. – Ч. II. – С. 222-224.

107. Черкасов, В. Д. Белковый пенообразователь для пенобетонов / В. Д. Черкасов, В. И. Бузулуков, А. И. Емельянов, Н. П. Сыркина, С. О. Гарцева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2013. – № 7 (655). – С. 23-27.
108. Чернов, А. Н. Монолитный газобетон / А. Н. Чернов // Популярное бетоноведение. – 2008 – № 2. – С. 54-56.
109. Черных, В. Ф. Проблемы производства и эксплуатации неавтоклавного пенобетона/ В. Ф. Черных, С. А. Удодов, Е. В. Шестакова // Популярное бетоноведение. Ячеистые бетоны в строительстве. – 2008. – С. 198-205.
110. Черных, В. Ф. Технологическая линия по производству изделий неавтоклавного твердения / В. Ф. Черных, В. И. Ницун, В. В. Герасимов // Строительные Материалы. – 1998. – № 12. – С. 24-51.
111. Чистов, Ю. Д. Наномодификаторы в неавтоклавном ячеистом бетоне / Ю. Д. Чистов, М. В. Краснов // Технологии бетонов. – 2010. – № 7-8. – С. 68-70.
112. Шахова, Л. Д. Технология пенобетона. Теория и практика / Л. Д. Шахова. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 248 с.
113. Шахова, Л. Д. Деформационные явления в пенобетоне / Л. Д. Шахова, С. А. Самборский, А. В. Бурдюгов // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 2. – С. 91 – 94.
114. Шахова, Л. Д. Выбор песков для получения теплоизоляционных пенобетонов / Л. Д. Шахова // Технологии бетонов. – 2014. – № 4. – С 12-13.
115. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с
116. Шейкин, А. Е. Строительные материалы: учебник для вузов / А. Е. Шейкин. – М.: Стройиздат, 1968. – 312 с.
117. Штарк, И. Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт ; перевод с нем. А. Тулаганов. – Киев: Оранта, 2004. – 295 с.
118. А. с. 1671646 СССР, МПК С04В38/02. Сырьевая смесь для изготовления ячеистого бетона / Стрельников А. Н., Пухаренко Ю. В., Лобанов И. А. (СССР). – № 4609874/33; заявл. 30.11.1988; опубл. 23.08.1991, Бюл. № 31.

119. Lindon, K. A. Coal Fired Power Station Ash Products and EU Regulation / K. A. Lindon // Coal Combustion and Gasification Products. – 2009. – № 1. – P. 63-66.
120. Nassif, H. Concrete Shrinkage Analysis for Bridge Deck Concrete / H. Nassif, K. Aktas, H. Najm, N. Suksawang // Technical report. – 2007. – P. 3 – 43.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Определение расчетного состава фибропенобетона

Состав назначается с учетом отношения массы наполнителя к массе вяжущего (С). За исходное водотвердое отношение (В/Т) принимается такое значение, которое обеспечивает необходимую текучесть раствора, определяемую с помощью вискозиметра Сутгарда. Определение расхода материалов осуществляется на основе следующих расчетных зависимостей:

$$P_{\text{сух}} = \frac{\rho_c}{K_c} \cdot V \quad (2.1)$$

$$K_c = 1,1$$

$$P_{\text{в}} = \frac{P_{\text{сух}}}{C + 1} \quad (2.2)$$

$$P_{\text{к}} = P_{\text{сух}} - P_{\text{в}} \quad (2.3)$$

$$P_{\text{воды}} = P_{\text{сух}} \cdot B/T \quad (2.4)$$

где $P_{\text{сух}}$ - расход сухих материалов, кг;

$P_{\text{в}}$ - расход вяжущего вещества, кг;

$P_{\text{к}}$ - расход кремнеземистого компонента, кг;

$P_{\text{воды}}$ - расход воды, л;

V - заданный объем замеса, л;

ρ_c - заданная средняя плотность бетона, кг/л;

K_c - коэффициент, учитывающий увеличение массы бетона за счет

связанной воды.

Принимаем отношение массы наполнителя к массе вяжущего $C = 0,75$

Проектируемая плотность пенобетона 1200 кг/м^3

Расчетный объем замеса 1 м^3

Расход сухих материалов: $P_{\text{сух}} = \frac{1200}{1,1} \cdot 1 = 1090 \text{ кг}$

Расход вяжущего вещества: $P_e = \frac{1090}{0,75+1} = 623$ кг

Расход кремнеземистого компонента: $P_k = 1090 - 623 = 467$ кг

По данным предварительных замесов устанавливаем значение В/Т = 0,24

Расход воды: $P_{\text{воды}} = 1090 \cdot 0,24 = 262$ л

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Вывод уравнения регрессии

Согласно плану было изготовлено 8 серий образцов из фибропенобетона различных составов. Значения усадки образцов фибропенобетона приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Усадка фибропенобетона

Номер серии опытов	Значения параллельных измерений функций отклика y (ϵ), мм/м			Ср. знач. , мм/м	S_i^2
1	1,45	1,52	1,56	1,51	0,00320
2	1,91	1,86	1,66	1,81	0,01750
3	1,70	1,67	1,59	1,65	0,00323
4	1,63	1,56	1,61	1,60	0,00108
5	1,45	1,38	1,50	1,44	0,00363
6	1,49	1,56	1,58	1,54	0,00227
7	2,12	1,82	1,81	1,92	0,03103
8	2,06	1,96	2,05	2,02	0,00303
	Σ			13,50	0,065

Среднее значение функции отклика вычислялось по формуле:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^k y_{ij},$$

где j – номер серии опытов, ($j = 1, 2, 3, \dots, 8$);

K – число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях, ($K = 3$);

i – номер опыта в данной серии, ($i = 1, 2, 3$).

Оценка дисперсии для каждой серии опытов вычислялась по формуле:

$$S_j^2 = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{i=1}^K (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$$

Расчетное значение критерия Кохрена определяется по формуле:

$$G_p = \frac{S_{j_{\max}}^2}{\sum_{j=1}^N S_{j_{\max}}^2} = \frac{0,031}{0,065} = 0,477$$

Табличное значение $G = 0,516$ взято для следующих значений параметров:

- уровень значимости 5%;
- число степеней свободы $f = K - 1 = 2$;
- $N = 8$.

Условие $G_p \leq G$ выполнено, следовательно, опыты воспроизводимы.

Оценка однородности дисперсии:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N S_j^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,065 = 0,008$$

Оценка дисперсии среднего значения рассчитывалась по формуле:

$$S_y^2 = \frac{S_y^2}{K} = \frac{0,008}{3} = 0,003$$

Для установления значимости коэффициентов регрессии вычисляется ошибка в их оценке:

$$S_b = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,003}{8}} = 0,0184$$

Расчет коэффициентов регрессии производился по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \bar{y}_j;$$

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot \bar{y}_i;$$

$$b_{im} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot \bar{y}_j, l \neq m;$$

где j – номер опыта;

i, l, m – номер факторов.

Значимость коэффициентов регрессии проверялась по t – критерий Стьюдента. Считается, что коэффициент регрессии значим, если выполняется условие:

$$|b_i| \geq S_b \cdot t,$$

где t – значение критерия Стьюдента, взятое из таблицы в соответствии с числом степеней свободы.

Число степеней свободы:

$$f = N \cdot (K - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$$

Тогда $S_b \cdot t = 0,0184 \cdot 2,12 = 0,039$

$$|b_0| = 1,688 > S_b \cdot t$$

$$|b_1| = 0,057 > S_b \cdot t$$

$$|b_2| = 0,111 > S_b \cdot t$$

$$|b_3| = 0,044 > S_b \cdot t$$

$$|b_{12}| = 0,043 > S_b \cdot t$$

$$|b_{13}| = 0,005 < S_b \cdot t$$

$$|b_{23}| = 0,128 > S_b \cdot t$$

$$|b_{123}| = 0,045 > S_b \cdot t$$

Констатируем, что только коэффициент $|b_{1,3}|$ не значим, и уравнение регрессии будет выглядеть:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

$$Y = 1,69 - 0,06 \cdot x_1 - 0,11 \cdot x_2 - 0,04 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 x_2 + 0,13 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Проверка адекватности уравнения с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{\max(S_{ad}^2, S_y^2)}{\min(S_{ad}^2, S_y^2)},$$

где S_{ad}^2 – оценка дисперсии адекватности.

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - B} \cdot \sum_{j=1}^N (y_j^3 - y_j^p) = \left(\frac{1}{6}\right) \cdot 0,0008 = 0,00013$$

где B – число коэффициентов регрессии уравнения ($B = 2$),

N – число опытов эксперимента ($N = 8$);

y_j^3 – экспериментальное значение функции отклика в j -м опыте;

y_j^p – значение функции отклика, рассчитанное по уравнению регрессии.

С оценкой дисперсии адекватности связано число степеней свободы

$$f_{ad} = N - B = 6$$

Уравнение регрессии адекватно, если расчетное значение критерия Фишера не превосходит его табличного значения.

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,00013}{0,003} = 0,05 < F_{[6;2]} = 5,14$$

Следовательно, уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

Выводы:

- Опыты воспроизводимы;
- Коэффициенты регрессии значимы;
- Уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Вывод уравнения регрессии

Согласно плану было изготовлено 8 серий образцов из фибропенобетона различных составов. Значения прочности на изгиб образцов фибропенобетона приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Прочность на изгиб образцов фибропенобетона

Номер серии опытов	Значения параллельных измерений функций отклика y ($R_{изг}$), МПа			Ср. знач. , МПа	S_i^2
1	2,20	2,15	2,01	2,12	0,010
2	3,90	4,00	4,10	4,00	0,010
3	3,50	3,70	3,75	3,65	0,018
4	1,80	1,70	2,20	1,90	0,070
5	2,80	2,90	3,00	2,90	0,010
6	3,65	3,70	3,90	3,75	0,018
7	2,10	2,20	2,30	2,20	0,010
8	1,70	1,80	1,90	1,80	0,010
			Σ	22,32	0,155

Среднее значение функции отклика вычислялось по формуле:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^k y_{ij}$$

где j – номер серии опытов, ($j = 1, 2, 3, \dots, 8$);

K – число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях, ($K = 3$);

i – номер опыта в данной серии, ($i = 1, 2, 3$).

Оценка дисперсии для каждой серии опытов вычислялась по формуле:

$$S_j^2 = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{i=1}^K (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$$

Расчетное значение критерия Кохрена определяется по формуле:

$$G_p = \frac{S_{j_{\max}}^2}{\sum_{j=1}^N S_{j_{\max}}^2} = \frac{0,070}{0,155} = 0,452$$

Табличное значение $G = 0,516$ взято для следующих значений параметров:

- уровень значимости 5%;
- число степеней свободы $f = K - 1 = 2$.
- $N = 8$

Условие $G_P \leq G$ выполнено, следовательно, опыты воспроизводимы.

Оценка однородности дисперсии:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N S_j^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,155 = 0,019$$

Оценка дисперсии среднего значения рассчитывалась по формуле:

$$S_y^2 = \frac{S_y^2}{K} = \frac{0,019}{3} = 0,006$$

Для установления значимости коэффициентов регрессии вычисляется ошибка в их оценке:

$$S_b = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,006}{8}} = 0,028$$

Расчет коэффициентов регрессии производился по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \bar{y}_j;$$

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot \bar{y}_i;$$

$$b_{im} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot \bar{y}_j, l \neq m;$$

где j – номер опыта;

i, l, m – номер факторов.

Значимость коэффициентов регрессии проверялась по t – критерий Стьюдента. Считается, что коэффициент регрессии значим, если выполняется условие:

$$|b_i| \geq S_b \cdot t,$$

где t – значение критерия Стьюдента, взятое из таблицы в соответствии с числом степеней свободы.

Число степеней свободы:

$$f = N \cdot (K - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$$

Тогда $S_b \cdot t = 0,028 \cdot 2,12 = 0,0602$

$$|b_0| = 2,790 > S_b \cdot t$$

$$|b_1| = 0,072 > S_b \cdot t$$

$$|b_2| = 0,403 > S_b \cdot t$$

$$|b_3| = 0,128 > S_b \cdot t$$

$$|b_{12}| = 0,610 > S_b \cdot t$$

$$|b_{13}| = 0,040 < S_b \cdot t$$

$$|b_{23}| = 0,260 > S_b \cdot t$$

$$|b_{123}| = 0,298 > S_b \cdot t$$

Констатируем, что только коэффициент $|b_{13}|$ не значим, и уравнение регрессии будет выглядеть:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

$$Y = 2,79 - 0,07 \cdot x_1 + 0,40 \cdot x_2 + 0,13 \cdot x_3 - 0,61 \cdot x_1 x_2 - 0,26 \cdot x_2 x_3 - 0,30 \cdot x_1 x_2 x_3$$

Проверка адекватности уравнения с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{\max(S_{ad}^2, S_y^2)}{\min(S_{ad}^2, S_y^2)},$$

где S_{ad}^2 – оценка дисперсии адекватности.

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - B} \cdot \sum_{j=1}^N (y_j^o - y_j^p) = \left(\frac{1}{6}\right) \cdot 0,013 = 0,002$$

где B – число коэффициентов регрессии уравнения ($B = 2$),

N – число опытов эксперимента ($N = 8$);

y_j^o – экспериментальное значение функции отклика в j -м опыте;

y_j^p – значение функции отклика, рассчитанное по уравнению регрессии.

С оценкой дисперсии адекватности связано число степеней свободы

$$f_{ad} = N - B = 6$$

Уравнение регрессии адекватно, если расчетное значение критерия Фишера не превосходит его табличного значения.

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,002}{0,006} = 0,33 < F_{[6;2]} = 5,14$$

Следовательно, уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

Выводы:

- Опыты воспроизводимы;
- Коэффициенты регрессии значимы;
- Уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Декор-Строй»

Кожевников А. В.

М.П. 14 августа 2014

АКТ № 14/8

О выпуске опытной партии неавтоклавного фибропенобетона

В период с 02.06.2014 по 05.08.2014 г. на территории производственного цеха ООО «Декор-Строй», г. Старая Русса, была выпущена опытно-промышленная партия пазогребневых плит размером 600х300х80 мм из неавтоклавного фибропенобетона плотностью 1200 кг/м³, объемом 7 м³. Фибропенобетон был произведен согласно действующего на производстве технологического регламента с добавлением комбинации полипропиленовой и базальтовой фибр в количестве 0,1 % и 0,2 % по объему.

Полученные фибропенобетонные изделия имеют следующие характеристики:

Средняя плотность: 1250 кг/м³

Прочность на сжатие: 5,2 Мпа

Прочность на изгиб: 2,7 Мпа

Значения деформаций усадки:

28 суток – 1,6 мм/м

56 суток – 1,8 мм/м

При выпуске опытно-промышленной партии использовались следующие материалы: цемент Сланцевского цементного завода ЦЕМ I 42,5 Н; минеральный порошок МП-1 (неактивированный) Угловского известкового комбината; песок речной; протеиновый пенообразователь «Laston» (Италия); полипропиленовые и базальтовые волокна длиной 12 мм.

В выпуске опытно-промышленной партии участвовали:

от ООО «Декор-Строй», г. Старая Русса:

начальник производства

Александров Ю. Н.

от СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург:

аспирант

Суворов И. О.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Декор-Строй»

Кожеников А. В.

М.П.

15 августа 2014

АКТ № 15/8

О выпуске опытной партии неавтоклавного фибропенобетона

В период с 02.06.2014 по 05.08.2014 г. на территории производственного цеха ООО «Декор-Строй», г. Старая Русса, была выпущена опытно-промышленная партия пазогребневых плит размером 600x300x80 мм из неавтоклавного фибропенобетона плотностью 1200 кг/м³, объемом 3 м³. Фибропенобетон был произведен согласно действующего на производстве технологического регламента с добавлением комбинации полипропиленовой и базальтовой фибр в количестве 0,2 % и 0,4 % по объему.

Полученные фибропенобетонные изделия имеют следующие характеристики:

Средняя плотность: 1217 кг/м³

Прочность на сжатие: 5,1 Мпа

Прочность на изгиб: 3,1 Мпа

Значения деформаций усадки:

28 суток – 1,3 мм/м

56 суток – 1,5 мм/м

При выпуске опытно-промышленной партии использовались следующие материалы: цемент Сланцевского цементного завода ЦЕМ I 42,5 Н; минеральный порошок МП-1 (неактивированный) Угловского известкового комбината; песок речной; протейновый пенообразователь «Laston» (Италия); полипропиленовые и базальтовые волокна длиной 12 мм.

В выпуске опытно-промышленной партии участвовали:

от ООО «Декор-Строй», г. Старая Русса:

начальник производства

Александров Ю. Н.

от СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург:

аспирант

Суворов И. О.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

ОКП 574600

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Декор-Строй»

Кожвников А. В.

М.П.

«17» февраля 2015 г.

**ИЗДЕЛИЯ СТЕНОВЫЕ ФИБРОПЕНОБЕТОННЫЕ**

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ТУ 5746-003-73112066-2015

Вводятся впервые

Дата введения

«17» февраля 2015 г.

РАЗРАБОТАНО:

д.т.н., профессор,

заведующий кафедрой технологии

строительных материалов и

метрологии СПбГАСУ

Пухаренко Ю. В.

аспирант кафедры технологии

строительных материалов и

метрологии СПбГАСУ

Суворов И. О.

Санкт-Петербург

2015 г.

Настоящие технические условия (далее – ТУ) распространяются на плиты пазогребневые для перегородок (далее – плиты) из фибропенобетона.

Фибропенобетон представляет собой композит, состоящий из пористой матрицы на основе минеральных вяжущих веществ с равномерно распределенными в ее объеме отрезками полимерных волокон (фибр), выполняющих функцию дисперсного упрочнителя.

Условное обозначение продукции должно состоять из сокращенного наименования изделия, цифр, обозначающих размеры в мм, марки по средней плотности и обозначения документа, например:

- для пазогребневых плит длиной 600 мм высотой 300 мм и толщиной 80 мм с маркой по средней плотности D 1200:

Плита ФПБ-600х300х80 D 1200 ТУ 5746-003-73112066-2015.

Перечень нормативной документации, на которые даны ссылки в ТУ, приведен в приложении 1.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

1.1. Изделия должны соответствовать требованиям технических условий и изготавливаться по технической документации, утвержденной в установленном порядке.

1.2. Фибропенобетонные пазогребневые плиты предназначены для устройства ненесущих перегородок в зданиях различного назначения (жилых и общественных), в том числе с сухим, нормальным и влажным режимами помещений.

1.2.1. Показатели физико-механических свойств пазогребневых плит должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 1.

Таблица 1

Показатели	D 1200
Размер изделий, мм	600x300x80
Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ³ , не более	1200
Класс бетона по прочности на сжатие, не менее	B 2,5
Марка по морозостойкости, не менее	F 25
Коэффициент теплопроводности, Вт / (м·К), не более	0,38
Индекс изоляции воздушного шума, Дб, не менее	43
Водостойкость	0,9
Отпускная влажность, %, не более	25
Минимальный технологический (клеевой) зазор пазогребневого соединения	
По длинной стороне, мм	2
По короткой стороне, мм	4

1.2.2. По согласованию с потребителями допускается изготовление плиты других типов и с другими размерами.

1.2.3. Значения отклонений геометрических параметров не должны превышать предельных, указанных в табл. 2.1. Не допускаются дефекты внешнего вида, размеры и число которых превышают указанные в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Наименование показателей	Предельные отклонения, мм
Отклонение размеров по: длине	± 3
ширине	± 2
толщине	± 1

Таблица 2.2

Наименование показателей	Значение
Отбитость углов и гребней на одной плите, шт., не более	2
Сколы, шт., не более	2
Повреждения:	
Углов на одной плите глубиной, мм	5
Гребней на одной плите глубиной, мм	5

1.2.4. Допустимые размеры дефектов плит:

- отклонение от перпендикулярности смежных граней должно быть не более 2 мм;

- отклонение от плоскости должно быть не более 2 мм.

1.2.5. В качестве формообразующих элементов паза и гребня используются специальные детали, которые являются упаковочным материалом. Вследствие применения формообразующих элементов возможно образование технологического литьевого облоя, не влияющего на качество продукции.

1.2.6. Лицевые поверхности плит должны быть ровными, не иметь жировых пятен.

1.2.7. Число плит с трещинами, пересекающими более двух граней, а также плит с трещинами по четырем граням не должно быть в сумме более 5 % партии по ГОСТ 21520. Количество половняка в партии должно быть не более 3 %.

1.3. Характеристика исходных материалов

Для изготовления изделий из фибропенобетона применяются:

- портландцемент без добавок, марки не ниже 400 по ГОСТ 10178 или класса 32,5 по ГОСТ 31108;

- наполнитель (песок или другие сухие сыпучие материалы с максимальной крупностью зерен не более 1,5 мм);

- фибра полимерная, фибра базальтовая;

- пенообразователь на основе поверхностно-активных веществ, соответствующий требованиям НД, действующей на территории РФ, и обеспечивающий получение пенобетона с заданными физико-механическими характеристиками;

- вода по ГОСТ 23732.

Все компоненты должны иметь заключения, подтверждающие их безопасность.

1.4. Упаковка

1.4.1. Упаковку изделий производят в соответствии с требованиями настоящих технических условий.

1.4.2. Изделия укладывают на поддоны по ГОСТ 18343 с жесткой фиксацией термоусадочной пленкой или перевязкой их лентой по ГОСТ 3560 или другим креплением, обеспечивающим неподвижность и сохранность изделий.

1.4.3. По согласованию с потребителем допускается применять упаковку другого вида, обеспечивающую сохранность изделий при погрузочно-разгрузочных работах, транспортировании и хранении.

1.5. Маркировка

1.5.1. На каждое упаковочное место (пакет) наклеивают ярлык (или этикетку), в котором указывают:

- наименование предприятия и (или) товарный знак предприятия-изготовителя, местонахождение (адрес);
- условное обозначение изделий;
- количество изделий, шт.;
- дату изготовления и номер партии;
- обозначение настоящих технических условий.

1.5.2. Допускается на ярлык наносить информационные надписи, способствующие сохранности изделий при погрузочно-разгрузочных работах, транспортировании и хранении.

1.5.3. Транспортная маркировка - по ГОСТ 14192.

2. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

2.1. Изделия фибропенобетонные не обладают взрывопожароопасными и токсичными свойствами.

2.2. При производстве фибропенобетонных изделий возможно образование:

- слабokonцентрированных цементных растворов от промывки технологического оборудования. При этом предусматривается очистка воды и ее повторное использование;

- пыли в результате выполнения транспортных и погрузочно-разгрузочных работ с цементом и другими дисперсными материалами;

- некондиционной продукции, которая используется предприятием в собственных целях.

Таким образом, производство плит является безотходным и не загрязняющим окружающую среду.

2.3. Для защиты органов дыхания необходимо применять респираторы, для индивидуальной защиты рук и ног – спецодежду.

3. ПРАВИЛА ПРИЕМКИ

3.1. Для установления соответствия изделий требованиям настоящих технических условий проводят приемосдаточные испытания.

3.2. Изделия предъявляют к приемке партиями. Партией считается количество изделий одного вида и размера недельной выработки и оформленных одним документом о качестве.

Минимальный размер партии – 1000 шт.

3.3. Для проведения приемо-сдаточных испытаний от каждой партии отбирают 2% изделий, но не менее 3-х штук.

3.4. Каждую принятую партию изделий оформляют документом о качестве, содержащим:

- наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- тип изделия;
- номер и дату выдачи документа о качестве, дату изготовления изделия;
- основные технические характеристики;
- количество изделий, шт.;
- обозначение настоящих технических изделий.

3.5. Приемо-сдаточные испытания проводят по п.п. 1.2.

3.6. При контроле показателей качества изделий для каждой партии изготавливают контрольные образцы фибропенобетона путем выпиливания из изделия.

3.7. Если установлено несоответствие требованиям технических условий по одному из контролируемых параметров, испытания проводят на удвоенном числе образцов. В случае неудовлетворительных результатов повторных испытаний партию бракуют и возвращают на доработку в соответствии с действующей технологической документацией.

3.8. Изделия принимают по результатам приемо-сдаточных испытаний по показателям средней плотности, прочности при сжатии, отпускной влажности и геометрическим параметрам.

Контроль морозостойкости и теплопроводности осуществляют перед началом массового производства, изменении технологии или качества материалов, но не реже 1 раза в 6 месяцев.

3.9. В соответствии с РМД 51-01-2006 Санкт-Петербург, ячеистый бетон представляет собой пористый искусственный каменный материал на цементном, известковом или смешанном вяжущих. Поры бетона

подразделяются на гелевые, капиллярные и газовые. Гелевые образуются на месте воды, ушедшей на гидратацию силикатов при встраивании в кристаллическую решетку последних. Капиллярные поры возникают вследствие испарения избыточной воды затворения. Капиллярные поры в виде микротрещин не влияют на прочностные характеристики фибропенобетона и способствуют лучшему сцеплению различных видов отделки с материалом.

4. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Изделия перед испытаниями должны быть выдержаны в течение 24 ч. при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(65 \pm 5)\%$.

4.2. Габаритные размеры проверяют линейкой Л-1000 по ГОСТ 427.

4.3. Отклонения от номинальных размеров и показатели внешнего вида изделий проверяют методами по ГОСТ 13015, ГОСТ 26433.0, ГОСТ 26433.1.

4.4. Технические характеристики изделий контролируют в соответствии с требованиями следующих стандартов:

- прочность по ГОСТ 10180;
- среднюю плотность по ГОСТ 12730.1;
- отпускную влажность по ГОСТ 12730.2 и ГОСТ 21718.
- марку по морозостойкости по ГОСТ 25485;
- коэффициент теплопроводности по ГОСТ 7076.

4.5. Проверку массы проводят взвешиванием на весах по ГОСТ 23676.

5. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ

5.1. Изделия транспортируют всеми видами транспорта, обеспечивающего сохранность изделий в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на каждом виде транспорте.

5.2. Изделия должны храниться рассортированными по типам, маркам и уложенными в штабели высотой не более 2,5 м.

5.3. При выполнении погрузочно-разгрузочных работ, а также при транспортировании и хранении изделий, должны предусматриваться меры, исключающие возможность их повреждения.

5.4. В случае перекладки плит, между отдельными изделиями следует помещать специальные детали для создания воздушного зазора.

6. ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ

6.1. Изготовитель гарантирует соответствие изделий требованиям настоящих технических условий при соблюдении потребителем правил их транспортирования, хранения и условий применения.

6.2. Гарантийный срок хранения - 12 мес. с момента изготовления изделий.

7. УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ

7.1. До начала работ по устройству перегородки следует удалить упаковочный материал и технологический облой с плит. Перед монтажом изделия выдержать в помещении для акклиматизации не менее суток.

7.2. Монтаж пазогребневых перегородок следует производить по три ряда, после чего дожидаться схватывания цементного клея для укладки блоков и плит из ячеистого бетона.

7.3. Возведение перегородок в зимних условиях (температура ниже +5 °С) возможно при условии применения специального клея для ячеистых бетонов с противоморозной добавкой.

7.4. В процессе укладки плит необходимо контролировать толщину горизонтальных и вертикальных швов, которая должна составлять от 3 до 5 мм.

Перечень**нормативных документов, на которые даны ссылки в ТУ**

ГОСТ 12730.1-78	п. 4.4
ГОСТ 10180-90	п. 4.4
ГОСТ 12730.2-78	п. 4.4
ГОСТ 21718-84	п. 4.4
ГОСТ 10178-85	п.1.3
ГОСТ 23732-79	п.1.3
ГОСТ 18343	п 1.4.2
ГОСТ 3560-73	п 1.4.2
ГОСТ 25485-89	п.4.4
ГОСТ 7076-99	п.4.4
ГОСТ 14192-96	п.1.5.3
ГОСТ 427-75	п.4.2
ГОСТ 13015-2003	п.4.3
ГОСТ 26433.0-85	п.4.3
ГОСТ 26433.1-89	п.4.3
ГОСТ 23676-79	п.4.5
ГОСТ 21520-89	п. 1.2.7
РМД 51-01-2006 Санкт-Петербург	п. 3.9

ПРИЛОЖЕНИЕ 8**Карта контроля производства перегородочных плит из фибропенобетона**

Наименование операции	Контролируемый параметр	Частота контроля	Нормы и технологические показатели	Метод испытания и средства контроля
1	2	3	4	5
ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ				
Хранение и подготовка исходных материалов	Активность цемента	для каждой партии	Не менее значений гарантированных маркой (классом)	Лабораторные испытания в соответствии с ГОСТ 31108, ГОСТ 30515
	Насыпная плотность песка	для каждой партии	не нормируется	Весы, сосуд объемом 1 л
	Влажность песка	1 раз в смену	не нормируется	Весовой метод: весы, сушильный шкаф
	Физико-механические показатели МП-1	для каждой партии	Не менее значений гарантированных маркой	Лабораторные испытания в соответствии с ГОСТ Р 52129
	Температура воды	1 раз в смену	Не более +35 град	Термометр
ОПЕРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ				
Приготовление фибропенобетонной смеси	Соотношение компонентов	1 раз в смену	рабочий состав смеси	Проверка правильности дозирования
	средняя плотность смеси	Каждый цикл	расчетный показатель	Весовой метод; весы, сосуд объемом 1 л
Формование	Размеры форм	1 раз в 6 месяцев	отклонения размеров не более установленных НД	Рулетка
Твердение изделий	Температура воздуха	1 раз в смену	Не ниже +15 град	Термометр
ПРИЕМО-СДАТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ				
Приемка готовой продукции	Средняя плотность в сухом состоянии	для каждой партии	Не более заданной марки	Сушильный шкаф, весы, штангенциркуль

	Предел прочности на сжатие		Не менее указанной в НД	Пресс
	Отпускная влажность		Не более 25 %	Сушильный шкаф, весы
	Показатели внешнего вида	для каждой партии	Отклонения от формы и размеров, качество поверхности в соответствии с НТД	внешний осмотр, линейка, угольник
	Усадочные деформации	для каждой партии	Не более 3 мм/м	Штатив с индикатором часового типа, весы

ПРИЛОЖЕНИЕ 9



СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р

Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный университет

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР «БЛОК»

198005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская, 4
 Аттестат аккредитации
 № РОСС RU. 0001.21.СЛ96 от 09 марта 2010г.
 Действителен до 09 марта 2015г.

ПРОТОКОЛ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ
 № 15 от 27.03.12

1. Основание для проведения испытаний: договор № 226/12 от 11.03.2012
2. Наименование продукции: 1. фибронобетонные стеновые изделия плотностью 800 кг/м³
2. фибронобетонные стеновые изделия плотностью 1200 кг/м³
3. Испытание на соответствие СП 51.13330.2011 2 «Защита от шума» актуализированная версия СНиП 23-03-03 «Защита от шума», ТУ 5746-002-73112066-2012
4. Производитель продукции: ООО «Декор-Строй» 175202, Новгородская обл., Старая Русса, ул. К.Петкин, д.79
5. Предъявитель: ООО «Декор-Строй» 175202, Новгородская обл., Старая Русса, ул. К.Петкин, д.79
6. Сведения об испытываемых образцах: 1. Стена из фибронобетонных стеновых изделий плотностью 800 кг/м³ между комнатами площадью 8 м²
2. Стена из фибронобетонных стеновых изделий плотностью 1200 кг/м³ между комнатами площадью 8 м²
7. Регистрационные данные ИЦ № 015-12-с
8. Методики испытаний ГОСТ 27296-87, методика определения изоляции воздушного шума ограждающих конструкций
9. Дата испытания образцов 11.03.2012 – 27.03.2012

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Индекс изоляции воздушного шума составляет
 стена из фибронобетонных стеновых изделий плотностью 800 кг/м³ между комнатами площадью 8 м²
 $R_w = 38$ дБ
 стена из фибронобетонных стеновых изделий плотностью 1200 кг/м³ между комнатами площадью 8 м²
 $R_w = 43$ дБ

Руководитель Испытательного Центра «БЛОК»



ПРИЛОЖЕНИЕ 10



СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р

Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный университет


ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР «БЛОК»

198005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская, 4
Аттестат аккредитации

№ РОСС RU. 0001.21.СЛ96 от 09 марта 2010г.
Действителен до 09 марта 2015г.

ПРОТОКОЛ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
№ 34 от 11.07.12

1. Основание для проведения испытаний: договор № 226/12 от 11.03.2012
2. Наименование продукции: фибробетонные стеновые изделия плотностью 1200 кг/м³
3. Испытание на соответствие СП 51.13330.2011 «Защита от шума» актуализированная версия СНИП 23-03-03 «Защита от шума», ТУ 5746-002-73112066-2012
4. Производитель продукции: ООО «Декор-Строй» 175202, Новгородская обл., Старая Русса, ул. К.Цеткин, д.79
5. Предъявитель: ООО «Декор-Строй» 175202, Новгородская обл., Старая Русса, ул. К.Цеткин, д.79
6. Сведения об испытываемых образцах: стена из фибробетонных стеновых изделий плотностью 1200 кг/м³ с облицовкой керамической плиткой на цементно-песчаном растворе с одной стороны и штукатуркой с другой общей толщиной 110 мм между комнатами площадью 8 м²
7. Регистрационные данные ИЦ № 034-12-К
8. Методики испытаний ГОСТ 27296-87, методика определения изоляции воздушного шума ограждающих конструкций
9. Дата испытания образцов 10.06.2012 – 11.07.2012
10. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** Индекс изоляции воздушного шума стены из фибробетонных стеновых изделий плотностью 1200 кг/м³ с облицовкой керамической плиткой на цементно-песчаном растворе с одной стороны и штукатуркой с другой общей толщиной 110 мм между комнатами площадью 8 м² составляет
 $R_w = 47$ ДБ

Руководитель Испытательного Центра «БЛОК»  Дацюк Т.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11



СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р

Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный университет

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР «БЛОК»

198005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская, 4
Аттестат аккредитации

№ РОСС RU. 0001.21.СЛ96 от 09 марта 2010г.
Действителен до 09 марта 2015г.

ПРОТОКОЛ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
№ 34 от 11.07.12

1. Основание для проведения испытаний: договор № 226/12 от 11.03.2012
2. Наименование продукции: фибробетонные стеновые изделия плотностью 1200 кг/м³
3. Испытание на соответствие СП 51.13330.2011 «Защита от шума» актуализированная версия СНИП 23-03-03 «Защита от шума», ТУ 5746-002-73112066-2012
4. Производитель продукции: ООО «Декор-Строй» 175202, Новгородская обл., Старая Русса, ул. К.Цеткин, д.79
5. Предъявитель: ООО «Декор-Строй» 175202, Новгородская обл., Старая Русса, ул. К.Цеткин, д.79
6. Сведения об испытываемых образцах: Двухслойная стена из фибробетонных стеновых изделий плотностью 1200 кг/м³ с воздушным промежутком толщиной 30 мм между комнатами площадью 8 м²
7. Регистрационные данные ИЦ № 034-12-К
8. Методики испытаний ГОСТ 27296-87, методика определения изоляции воздушного шума ограждающих конструкций
9. Дата испытания образцов 10.06.2012 – 11.07.2012
10. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** Индекс изоляции воздушного шума двухслойной стены из фибробетонных стеновых изделий плотностью 1200 кг/м³ с воздушным промежутком толщиной 30 мм между комнатами площадью 8 м² составляет $R_w = 53$ дБ

Руководитель Испытательного Центра «БЛОК»



Дацюк Т.А.