

На правах рукописи

Суворов Иван Олегович

**ДИСПЕРСНОЕ ПОЛИАРМИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ
СНИЖЕНИЯ УСАДКИ ФИБРОПЕНОБЕТОНА**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
Пухаренко Юрий Владимирович

Официальные оппоненты: **Хежев Толя Амирович**
советник РААСН, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова», кафедра строительного производства, профессор

Нелюбова Виктория Викторовна
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», кафедра материаловедения и технологии материалов, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск

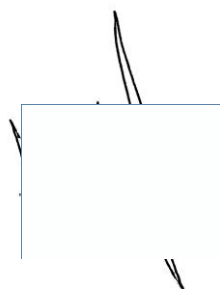
Защита диссертации состоится 14 февраля 2017 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.01** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/suvorov-ivan-olegovich>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Конюшков Владимир Викторович

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 низкомодульными, 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 натуральных 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 (патент на изобретение № 2592907 «Сырьевая смесь для изготовления пенобетона»).

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 исключаящих 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 гг.); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы образования и науки» (г. Тамбов, 2016 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 в соответствии с планом НИР № 7.546.2011 «Развитие фундаментальных основ и практических принципов получения строительных

конструкций повышенной эксплуатационной надежности и безопасности (применительно к уникальным зданиям и сооружениям)» по государственному заданию (рег. № 01201257464) и при поддержке грантов Правительства Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2011, 2013 гг.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, общим объемом 3,17 п. л., лично автором – 1,62 п. л., в том числе 4 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, патент на изобретение № 2592907.

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.

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе произведен критический анализ литературных данных по опыту применения неавтоклавного пенобетона в строительстве, описаны основные виды усадочных деформаций и приведена классификация факторов, влияющих на усадку. Сформулирована рабочая гипотеза.

Во второй главе представлена характеристика сырьевых материалов, описаны оборудование и методика проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния дисперсного полиармирования на усадочные деформации и прочностные характеристики неавтоклавного пенобетона. Определена эффективная комбинация армирующих волокон.

В четвертой главе представлены результаты промышленного внедрения неавтоклавного полиармированного фибропенобетона при производстве пазогребневых плит перегородок. Путем сравнительной оценки характеристик различных материалов показана технико-экономическая эффективность предлагаемых в диссертации технических и технологических решений.

В заключении изложены результаты диссертационного исследования, указаны перспективы дальнейших исследований по теме работы.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

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.

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 де-

формации. Показано, что наиболее эффективным приемом снижения усадки является дисперсное полиармирование, предусматривающее использование комбинации фибр с различными характеристиками.

Рабочая гипотеза: Высокомодульные волокна сдерживают усадочные деформации и блокируют образование трещин в плотных межпорowych 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 межпорowych перегородок следует применять фибру с высоким модулем упругости, а на макроуровне – низкомодульные 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.

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.

В соответствии с выдвинутой рабочей гипотезой, усадке и трещинообразованию, а также процессу развития трещин, препятствуют армирующие волокна, которые должны иметь определенные деформативные характеристики. Предложена математическая модель, в соответствии с которой представлена зависимость усадочных деформаций фибропенобетона от коэффициентов α_1 и α_2 :

$$\varepsilon_{\phi\delta} = \varepsilon_{\delta} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\phi\delta}$ и ε_{δ} – усадочные деформации фибропенобетона и пенобетона, мм/м.

Коэффициент α_1 характеризует зависимость усадочных деформаций фибропенобетона от модуля упругости ячеистого бетона и фибр, а так же от доли объемного армирования:

$$\alpha_1 = \frac{E_{\delta}}{\left(\sum_{i=1}^n E_{\phi i} \cdot k_i \right) \cdot \mu_0 + E_{\delta} (1 - \mu_0)}, \quad (2)$$

где E_{δ} и $E_{\phi i}$ – модуль упругости ячеистого бетона и фибр, МПа; μ_0 – коэффициент объемного армирования; k_i – доля i -го вида волокон в общем объеме армирования μ_0 (в случае полиармирования).

Торможению процесса развития трещин, уменьшению их длины, и, следовательно, усадки способствует степень дисперсности армирования. Трещины образуются в бетоне, а именно, в материале межпорowych 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.

Коэффициент α_2 характеризует влияние числа волокон в объеме композита и их геометрических характеристик:

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{4\mu_0} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2 \cdot l_i \cdot k_i}{v}, \quad (3)$$

где d – диаметр волокна, мм; l – длина волокна, мм; v – объем, мм³.

Для единичного объема зависимость принимает вид:

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

В случае полиармирования учитываются геометрические характеристики каждого вида волокон.

Расчетные зависимости степени снижения усадки с повышением модуля упругости волокон, уменьшением их длины, диаметра представлены на рисунке 1, рисунке 2 и рисунке 3.

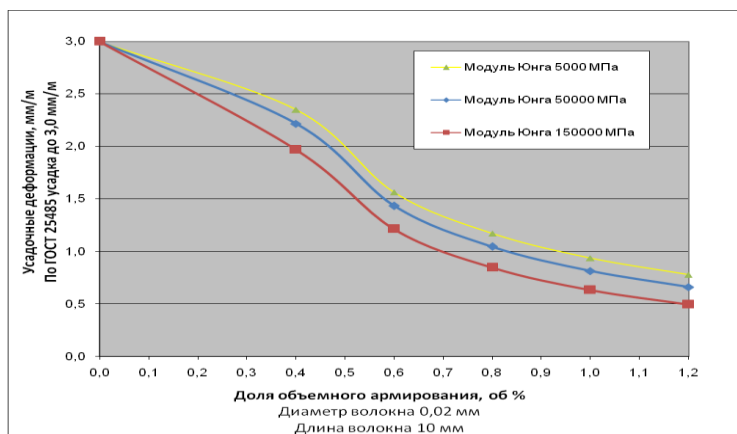


Рисунок 1 – Теоретическая зависимость усадки от модуля упругости волокон

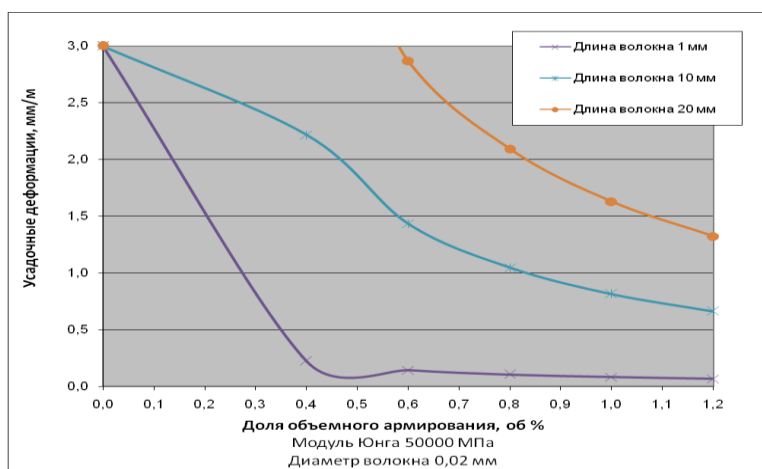


Рисунок 2 – Теоретическая зависимость усадки от длины волокон

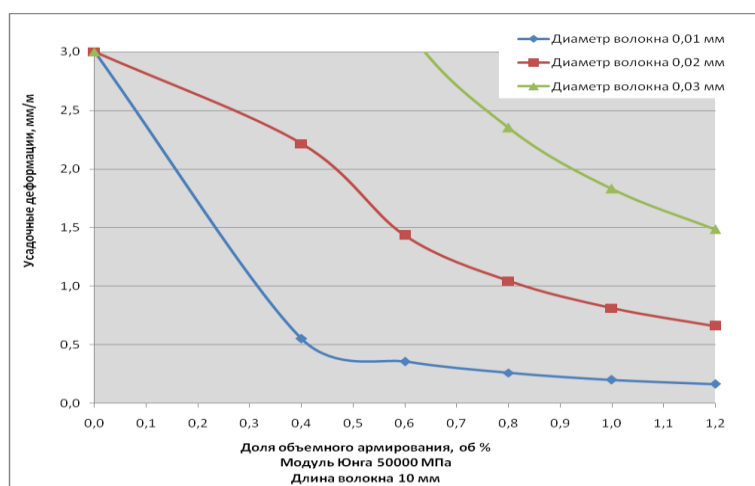


Рисунок 3 – Теоретическая зависимость усадки от диаметра волокон

Исходя из расчетных зависимостей, при доле объемного армирования до 0,6 %, длине фибр и диаметре более 20 мкм и 0,03 мкм соответственно, расчетная усадка превышает нормативное значение (3 мм/м по ГОСТ 25485). Выбор волокон для экспериментальных исследований был произведен исходя из результатов, представленных выше.

Во время проведения исследований применялись армирующие волокна, характеристика которых приведена в таблице 1. Для сравнения: модуль упругости ячеистого бетона равен 3000 МПа, тяжелого – 30 000 МПа.

Таблица 1 – Характеристика армирующих волокон

Тип армирующих волокон	Диаметр, мм	Длина, мм	Плотность, г/см ³	Удлинение при разрыве, %	Прочность на растяжение, МПа	Модуль Юнга (сред. знач.), МПа
Полипропилен	0,018	12,00	0,9	10,0-25,0	400-770	5750
Базальт	0,018	12,00	2,6	1,4-3,6	1600-3600	95000
Хризотил	0,028	1,35	2,6	0,5-0,7	910-3100	68000

На основе уравнений 1–4 были построены графики зависимости усадки фибропенобетона от объемного содержания комбинации рассматриваемых волокон. Теоретическая зависимость усадки от объемного содержания комбинации волокон представлена на рисунке 4.

При увеличении доли объемного армирования, усадка фибропенобетона значительно понижается. Таким образом, возможно управление усадочными деформациями и их прогнозирование при изменении комбинации волокон. Наименьшее значение коэффициента α_1 характерно для высокомодульных базальтовых волокон. Хризотилевые волокна отличаются большей дисперсностью, поэтому коэффициент α_2 характеризуется малыми значениями, при увеличении их доли. Исходя из полученной теоретической зависимости, хризотилевые волокна и их смесь с полипропиленовыми, базальтовыми фибрами, дает значительное снижение усадочных деформаций.

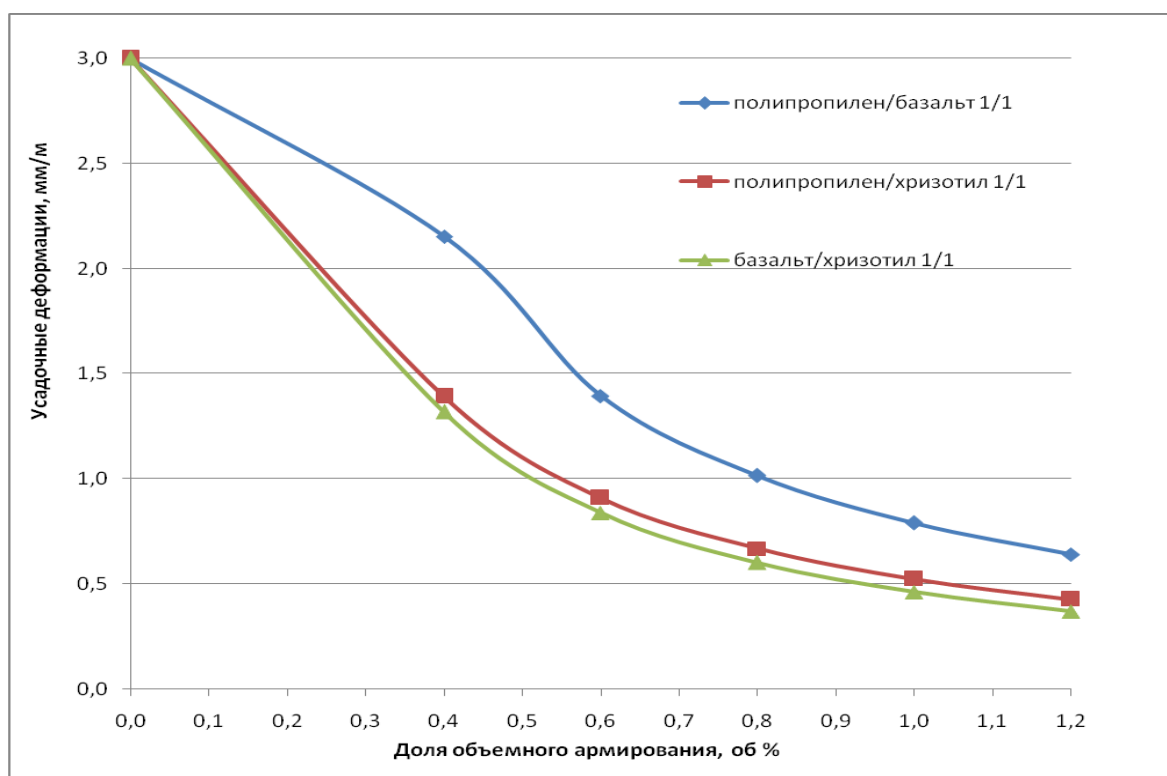


Рисунок 4 – Теоретическая зависимость усадки от объемного содержания комбинации волокон

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.

При проведении экспериментальных исследований принят сырьевой состав пенобетона плотностью 1200 кг/м^3 , характеризующийся минимальным расходом цемента с учетом требуемых прочностных характеристик. Использовались следующие сырьевые материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Сланцевского цементного завода; наполнитель – минеральный порошок МП-1 (ГОСТ Р 52129) и песок (ГОСТ 8736). Базовый состав пенобетона: цемент – 300 кг/м^3 , песок – 480 кг/м^3 , минеральный порошок – 300 кг/м^3 ; водотвердое отношение равно 0,26.

Для приготовления смеси использовалась лабораторная установка (рисунок 5), включающая в себя пенобетоносмеситель (1), пеногенератор (2) и воздушный компрессор (3). Пена вводилась до достижения расчетной плотности смеси. Лабораторная установка является аналогом промышленного оборудования для производства фибропенобетона. Изучено влияния вида и количества фибры на характеристики композита. Для этого в сырьевую смесь вводились полипропиленовые, базальтовые или хризотилловые армирующие волокна в количестве 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 % (здесь и далее – объемного армирования) соответственно. Границы объемного армирования установлены исходя из представленных выше теоретических зависимостей и в соответствии с принятой технологией.



Рисунок 5 – Лабораторная установка для приготовления фибропенобетонной смеси

На основании испытаний серии моноармированных образцов фибропенобетона можно сделать вывод о незначительном изменении прочности на сжатие (рисунок 6). Наблюдается рост прочности при изгибе на 110 % для образца с 0,6 % базальтовой фибры (рисунок 7). Образцы с полипропиленовой и хризотиловой фиброй характеризуются малым приростом прочности на изгиб. Введение армирующих волокон в количестве более 0,8 % по объему в рамках принятой технологии не позволяет добиться требуемой плотности.

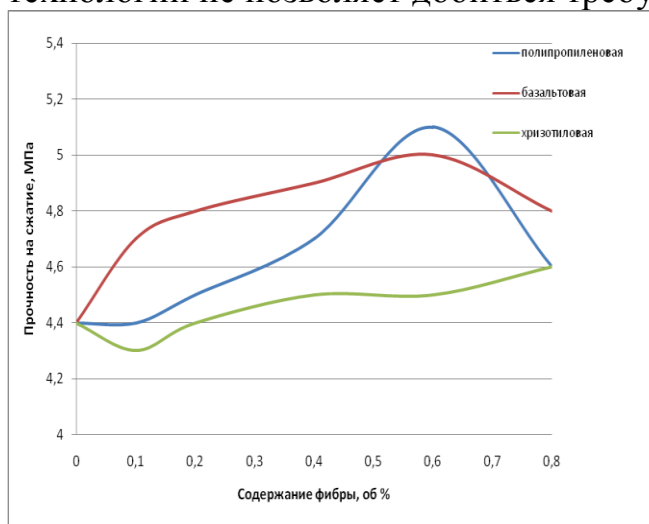


Рисунок 6 – Зависимость прочности на сжатие фибропенобетона от содержания армирующих волокон

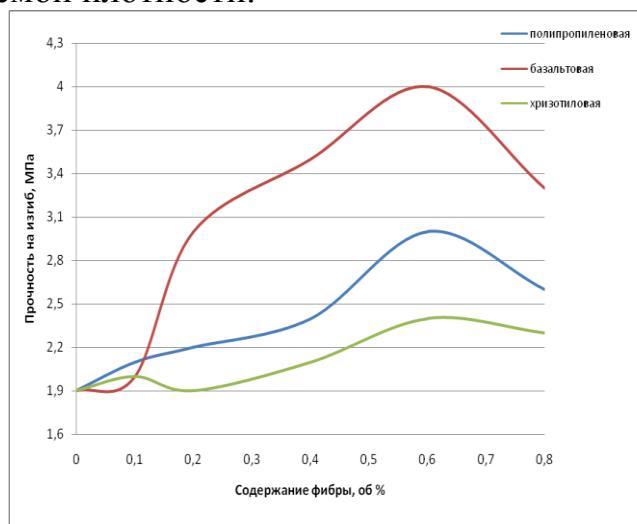


Рисунок 7 – Зависимость прочности на изгиб фибропенобетона от содержания армирующих волокон

Для определения значений усадки при высыхании неавтоклавного фибропенобетона применялся прибор в соответствии с ГОСТ 25485. Образцы-балочки 40×40×160 мм хранились в естественных условиях, и по истечении 14, 28, 56 и 112 суток от начального измерения определялась их длина и масса. Результаты определения усадочных деформаций фибропенобетона представлены на рисунке 8.

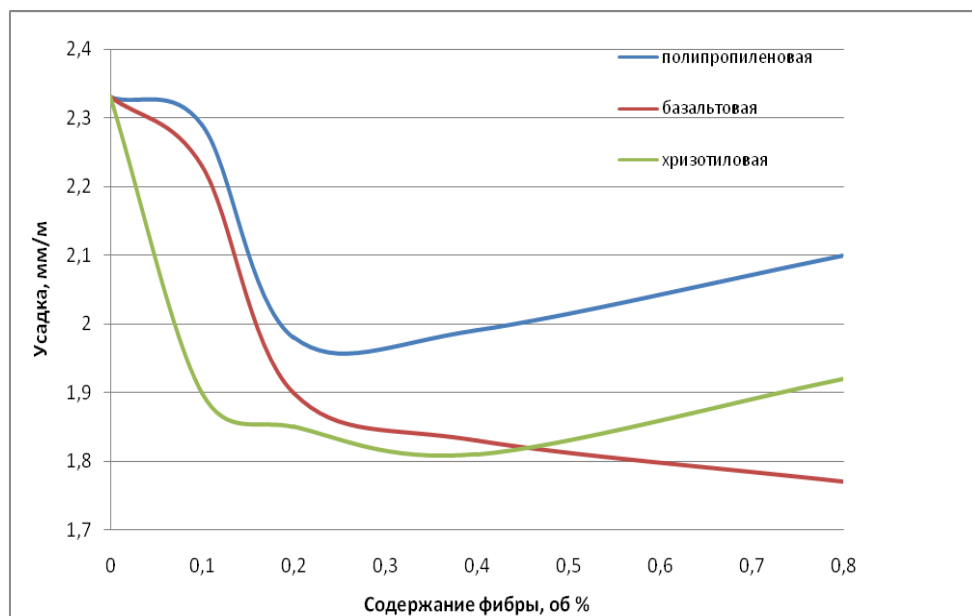


Рисунок 8 – Зависимость усадочных деформаций фибропенобетона на 112 сутки от содержания армирующих волокон

Введение полипропиленовой, базальтовой или хризотилловой фибры в сырьевые составы неавтоклавного фибропенобетона приводит к снижению усадочных деформаций на 15–24 %. Образец с содержанием полипропиленовой фибры в количестве 0,2 % 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), хризотилловой – с 0,4 % (1,81 мм/м). Образцы, армированные высокомодульными волокнами, показали большую эффективность по снижению усадочных деформаций. В рамках данного исследования необходимо учитывать комплекс свойств: минимальные усадочные деформации и высокие прочностные характеристики получаемого материала.

С целью дальнейшего снижения усадки фибропенобетона, как было показано ранее, следует применять комбинацию волокон. В соответствии с этим, на следующем этапе исследований выявлено, что введение в состав пенобетона одновременно нескольких видов волокон приводит к снижению усадочных деформаций. В таблице 2 приведены результаты испытаний образцов полиармированного фибропенобетона.

Наименьшие усадочные деформации характерны для образцов фибропенобетона, армированных полипропиленовой и базальтовой фиброй в количестве 0,2 % и 0,4 % об. соответственно (рисунок 9).

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов

№ п/п	Наименование	Фибра, % об.	Свойства		
			Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа
0	пенобетон без фибры (контрольный состав)	0	1216	4,4	1,9
1	фибропенобетон полиармированный полипропиленовым и базальтовым волокном	0,2 и 0,4	1207	5,1	3,0
2		0,4 и 0,2	1220	4,8	2,9
3		0,4 и 0,4	1256	5,0	4,3

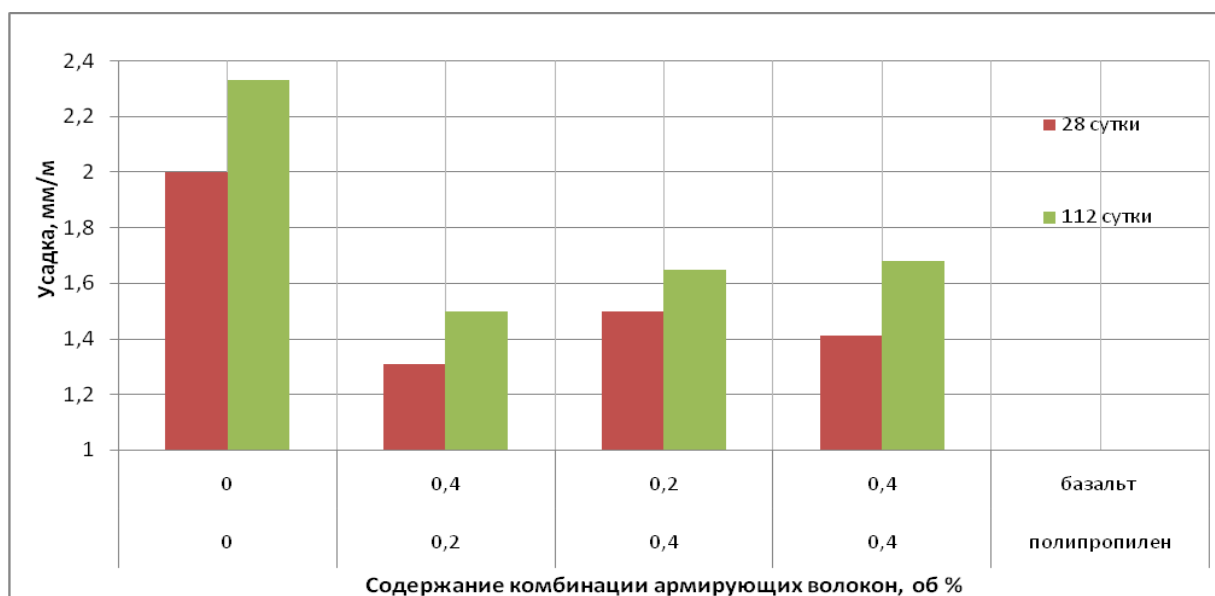


Рисунок 9 – Зависимость усадочных деформаций от комбинации полипропиленовых и базальтовых волокон

В случае полиармирования наблюдается снижение усадки на 36 % по сравнению с образцами без фибрового армирования и на 17 % по сравнению с моноармированным пенобетоном с 0,6 % базальтовой фибры.

Сравнение значений теоретической и фактической усадки фибропенобетона, армированного комбинацией полипропиленовых и базальтовых волокон представлено в таблице 3 и на рисунке 10.

Таблица 3 – Сравнение значений теоретической и фактической усадки

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

$$\varepsilon_{\text{фб}} = 1,14 \cdot \varepsilon_6 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad (5)$$

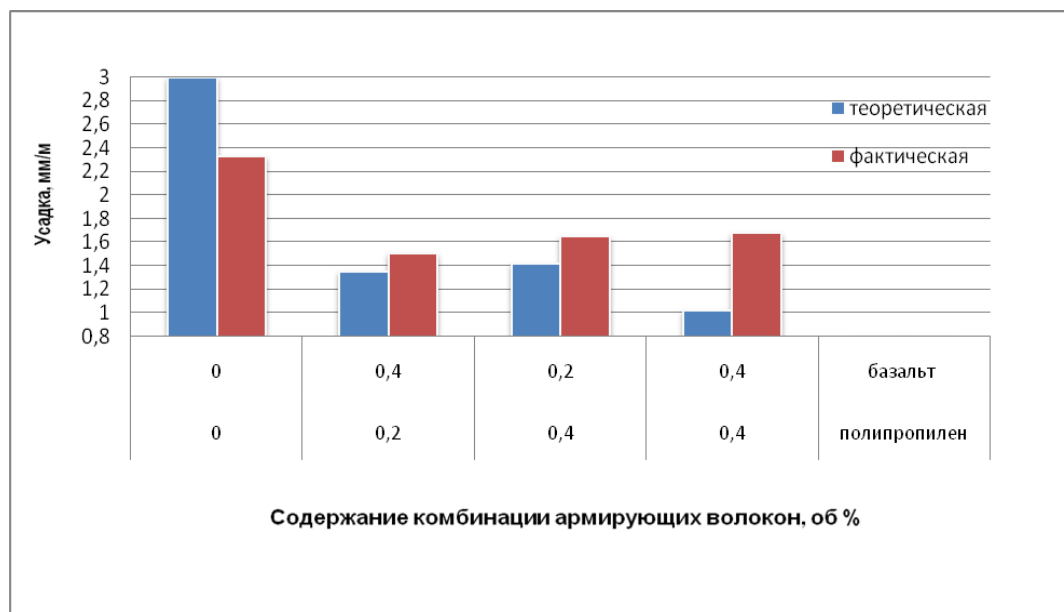


Рисунок 10 – Сравнение значений теоретической и фактической усадки фибропенобетона

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.

4. Разработан новый материал, включающий высоко- и низко модульные армирующие волокна при оптимальном их соотношении, обеспечивающем повышение прочности при малом расходе цемента (патент на изобретение № 2592907 «Сырьевая смесь для изготовления пенобетона»).

Учитывая, что хризотилловые волокна способствуют снижению усадки, для проверки их влияния в составе комбинации и смеси трех видов фибр на усадку был реализован план полного факторного эксперимента (ПФЭ). Представленные выше результаты позволили определить необходимые переменные и уровни варьирования ПФЭ. Получено уравнение регрессии зависимости усадки от количества армирующих волокон:

$$y = 1,69 - 0,06 \cdot x_1 - 0,11 \cdot x_2 - 0,04 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,13 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (6)$$

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

Из анализа уравнения (6) следует, что усадка фибропенобетона зависит от содержания и вида фибры, при этом их сочетание дает разный эффект. Зависимость усадочных деформаций от комбинации армирующих волокон, представленная на рисунке 11, позволяет отметить общую тенденцию, которая указывает на большую эффективность смеси низкомодульных полипропиленовых и высокомодульных базальтовых волокон. Комбинация базальтовых и хризотилловых фибр, а так же смесь трех видов волокон не позволяет эффективно снижать усадку.

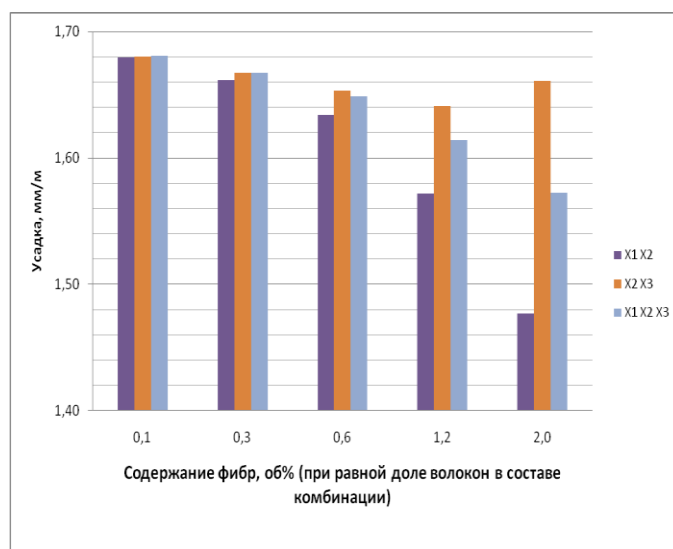


Рисунок 11 – Зависимость усадочных деформаций фибропенобетона от комбинации армирующих волокон

Для нахождения оптимальной комбинации полипропиленовых и базальтовых волокон были построены графики зависимости усадки от различного содержания фибр при постоянном значении одной составляющей комбинации и переменной другой (рисунок 12).

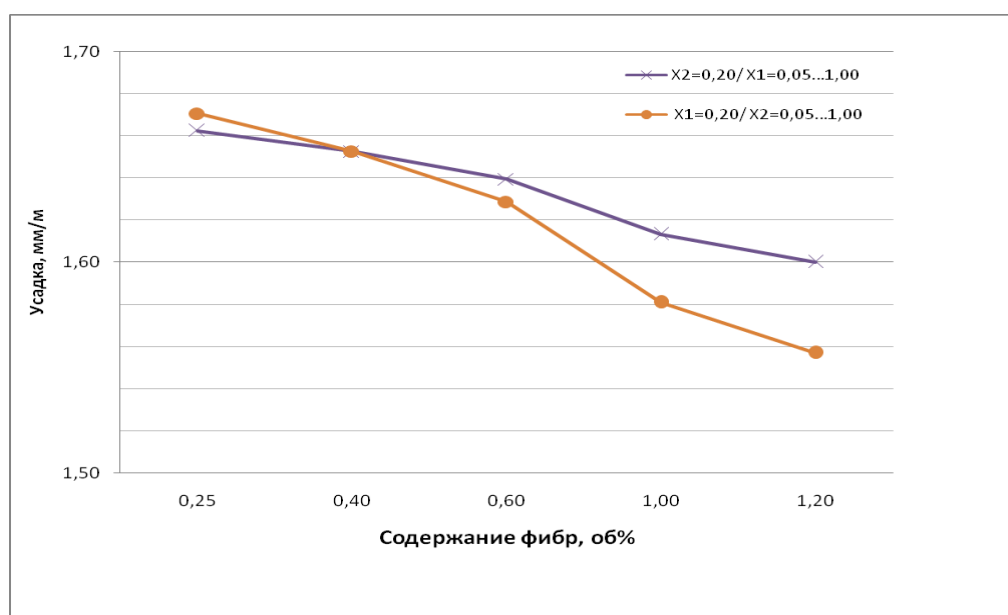


Рисунок 12 – Сравнение значений усадки по уравнению регрессии при различном соотношении волокон

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.

На основании полученных данных разработан состав неавтоклавного фибропенобетона, который использовался при выпуске опытно-промышленных партий пазогребневых плит на заводе ООО «Декор-Строй» (г. Старая Русса). Разработаны технические условия на стеновые изделия и получены акты о выпуске опытных партий. На технологической линии (рисунок 13) были изготовлены пазогребневые плиты размером 600×300×80 мм плотностью 1200 кг/м³ (рисунок 14). Данные изделия применяются для возведения межкомнатных и межквартирных перегородок.



Рисунок 13 – Технологическая линия



Рисунок 14 – Пазогребневая плита

Организовано опытно-промышленное производство полиармированного фибропенобетона. Технологической особенностью является введение дополнительного вида волокон. При проектировании составов сырьевых смесей были достигнуты требуемые нормативные прочностные характеристики. Количество цемента в сырьевой смеси выбиралось из условия обеспечения требуемой прочности на сжатие при минимальной усадке. Экономическая оценка производства пазогребневых плит произведена посредством расчёта стоимости материалов на один кубометр фибропенобетона различных составов (таблица 4).

Из таблицы следует, что внедрение разработанного состава привело к снижению стоимости сырьевых материалов на 14 %. При работе завода в одну смену, годовой выпуск равен 7200 м³ фибропенобетона. Значит, экономический эффект составляет 3 722 400 руб. в год.

Были проведены натурные испытания межкомнатных перегородок с целью определения индекса изоляции воздушного шума. Пазогребневые плиты из ячеистого фибробетона плотностью 1200 кг/м³ соответствуют нормативным требованиям по звукоизоляции межкомнатных перегородок (43 дБ по

СП 51.13330.2011) при толщине стены, равной 80 мм. Монтаж перегородки и вид стены из пазогребневых плит представлены на рисунках 15, 16.

Таблица 4 – 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
Молотый известняк	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..



Рисунок 15 – Монтаж перегородки

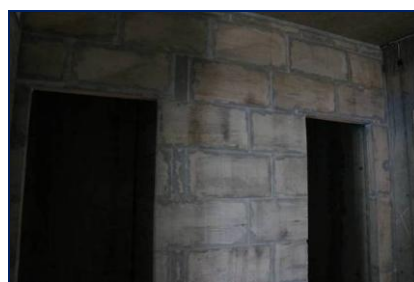


Рисунок 16 – Вид стены из пазогребневых плит

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Итогом диссертационного исследования являются следующие результаты:

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 низкомодульных полипропиленовых и высокомодульных 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 (получен патент на изобретение № 2592907 «Сырьевая смесь для изготовления пенобетона»).

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 3 722 400 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.

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. Суворов, И. О. Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавного твердения [Текст] / И. О. Суворов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – № 1. – С. 32-35. (0,25/ 0,25 п.л.).

2. Суворов, И. О. Влияние вида и количества армирующих волокон на усадочные деформации фибропенобетона [Текст] / И. О. Суворов // Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2014. – № 5 (46). – С. 90-94. (0,3/ 0,3 п.л.).

3. Пухаренко, Ю. В. Влияние состава сырьевой смеси на усадку неавтоклавного фибропенобетона [Текст] / Ю. В. Пухаренко, С. А. Черевко, И. О. Суворов // Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2013. – № 6(41). – С. 109-112. (0,25 / 0,08 п.л.).

4. Веселова, С. И. Пенобетон на базе отходов камнедробления [Текст] / С. И. Веселова, С. А. Черевко, И. О. Суворов // Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2010. – № 4(25). – С. 116-119 (0,25 / 0,08 п.л.).

5. Пат. № 2592907 РФ, МПК С04В 38/10. Сырьевая смесь для изготовления пенобетона / Пухаренко Ю.В., Суворов И.О.; опублик. 27.07.2016, Бюл. № 21.

Публикации в других изданиях:

6. Черевко, С.А. Неавтоклавный пенобетон на базе отходов камнедробления [Текст] / 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. (0,2 / 0,06 п.л.).

7. Черевко, С.А. Наномодифицированный пенобетон [Текст] / С. А. Черевко, **И. О. Суворов** // Научно-исследовательская работа студентов СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов победителей конкурса грантов 2010-2011 г. Вып. 6. – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2011. – С. 102-109. (0,5 / 0,25 п.л.).

8. **Суворов, И. О.** Наномодифицированный пенобетон неавтоклавного твердения на базе отходов камнедробления [Текст] / **И. О. Суворов**, К. А. Николаев, С. А. Черевко // Научно-исследовательская работа студентов, аспирантов и молодых ученых СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов, аспирантов и молодых ученых победителей конкурсов 2011 г. Вып. 7 – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2012. – С. 25-30. (0,4 / 0,12 п.л.).

9. **Суворов, И. О.** Технология изготовления ячеистобетонных изделий на основе гипсоцементнопуццолановых вяжущих (ГЦПВ) [Текст] / **И. О. Суворов**, К. А. Николаев, С. А. Черевко // Актуальные проблемы строительства и архитектуры: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2012. – В 2 ч. Ч. 2. – С. 122-125. (0,25 / 0,08 п.л.).

10. **Суворов, И. О.** Пути снижения усадочных деформаций неавтоклавного пенобетона [Текст] / **И. О. Суворов**, С. А. Черевко // Образование и наука: современное состояние и перспективы развития: Сб. научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 28 февраля 2013 г. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – В 10 ч. Ч. 5. – С. 131-132. (0,12 / 0,06 п.л.).

11. **Суворов, И. О.** Разработка способов снижения усадки неавтоклавного пенобетона [Текст] / **И. О. Суворов**, А. С. Богданова, А. И. Марченко // Актуальные проблемы строительства: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2013. – С. 170-172. (0,2 / 0,06 п.л.).

12. **Суворов, И. О.** Разработка составов и исследование свойств полиармированных фибропенобетонов неавтоклавного твердения [Текст] / **И. О. Суворов**, А. С. Богданова, А. И. Марченко // Актуальные проблемы строительства: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. – СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – В 5 ч. Ч. 1. – С. 196-199. (0,25 / 0,08 п.л.).

13. **Суворов, И. О.** Теоретические принципы снижения усадки ячеистого бетона [Текст] / **И. О. Суворов** // Вестник научных конференций: Актуальные вопросы образования и науки: Сб. научных трудов по материалам международной научно-практической конференции 30 июня 2016 г. – Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2016. – В 4 ч. Ч. 3. – С. 89-91. (0,2/0,2 п.л.).

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 30.11.2016. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ 173.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, ул. Егорова, д. 5/8, лит. А.