

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

*На правах рукописи*



СИНИЦИНА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ТЕХНОЛОГИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ В  
ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ ЧЕРЕПИЦЫ  
ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ**

Специальность 2.1.5 – «Строительные материалы и изделия»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель,  
доктор технических наук, профессор  
И.В.Недосеко

Уфа 2024

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Материалы и изделия для устройства скатных кровель.....	13
1.2 Нормативная база производства керамической и цементно-песчаной черепицы.....	31
1.3 Технологические особенности производства цементно-песчаной черепицы.....	34
1.4 Применение технологии фильтрационного прессования для изготовления плитных облицовочных изделий.....	44
1.5 Выводы по первой главе.....	48
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ.....	50
2.1 Факторы, обеспечивающие формирование структурно-механических характеристик цементного камня.....	50
2.2 Особенности формирования структуры цементного камня бетонов с высокими прочностными и эксплуатационными свойствами.....	57
2.3 Особенности применения технологии фильтрационного прессования для изготовления тонкостенных изделий на цементно-песчаной основе.....	65
2.4 Выводы по второй главе.....	70
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ.....	71
3.1 Исходные сырьевые материалы для проведения исследований.....	71
3.2 Методики проведения экспериментальных исследований и разработка составов цементно-песчаной смеси.....	79

3.3 Исследование возможности использования вторичного сырья при производстве цементно-песчаной черепицы .....	90
3.4 Определение физико-механических характеристик образцов цементно-песчаных композитов различных составов.....	97
3.5 Выводы по третьей главе.....	109
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ.....	110
4.1 Оценка степени влияния основных факторов на свойства цементно-песчаных композитов, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования.....	110
4.2 Оценка динамики набора прочности цементно-песчаных композитов, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования.....	116
4.3 Оценка долговечности цементно-песчаных композитов, изготовленных по технологии фильтрационного прессования.....	119
4.4 Исследование цементно-песчаных композитов, полученных по технологии фильтрационного прессования, с применением электронной микроскопии.....	124
4.5 Выводы по четвертой главе.....	127
5. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ ЧЕРЕПИЦЫ .....	128
5.1 Нормативные документы, определяющие требования к цементно-песчаной черепице.....	128
5.2 Изготовление экспериментальных образцов цементно-песчаной черепицы по технологии фильтрационного прессования.....	131

5.3 Результаты испытаний экспериментальных образцов цементно-песчаной черепицы.....	140
5.4 Разработка технологической схемы производства цементно-песчаной черепицы по методу фильтрационного прессования.....	145
5.5 Выводы по пятой главе.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	149
Список литературы.....	151
Приложение А. Скан-копия Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663812.....	166
Приложение Б. Скан-копия ТУ 23.61.11-027-02069450-2024.....	167
Приложение В. Акт и протоколы испытаний опытной партии цементно-песчаной плоской ленточной черепицы, изготовленной по технологии фильтрационного прессования.....	180
Приложение Г. Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс.....	184

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В настоящее время для устройства скатных кровель наиболее распространены следующие виды кровельных материалов и изделий: волнистые и плоские асбестоцементные листы (шифер); металлочерепица; профилированные металлические листы (профнастил); гибкая (битумная) черепица; битумный волнистый лист ондулин (еврошифер); композитная черепица; керамическая черепица; цементно-песчаная черепица; полимерпесчаная черепица, каждый из этих материалов обладает определенными достоинствами и недостатками.

Наибольшей долговечностью (100 лет и более) из всех кровельных материалов и изделий обладает керамическая черепица, изготавливаемая из природного глинистого сырья, ее важнейшими достоинствами является негорючесть, высокая огнестойкость, морозостойкость и коррозионная стойкость, отсутствие электропроводимости, бесшумность во время непогоды. К недостаткам керамической черепицы можно отнести хрупкость и сравнительно большой вес, что приводит к увеличению материалоемкости и удорожанию стропильных конструкций. Также значительным недостатком керамической черепицы являются высокие требования к глинистому сырью и энергоемкая технология производства, что в конечном итоге приводит к высокой стоимости готовых изделий.

Альтернативой керамической черепице является цементно-песчаная черепица, которая также является негорючей, но при этом производится из широко распространенных материалов – цемента и мелкого песка с добавлением натуральных красителей (пигментов), не требует энергоемкого высокотемпературного обжига, и за счет этого имеет значительно меньшую стоимость. Однако, цементно-песчаные кровельные изделия, изготавливаемые по традиционным технологиям (вибропрессование, прокатка, вибропрокатка), имеют меньшую прочность, их значительным недостатком также является пористая шероховатая поверхность, на которой задерживаются пыль, грязь, отходы жизнедеятельности птиц, поселяются лишайники и мхи, в результате требуется

периодическая очистка поверхности кровли механическим или химическим способом. Для улучшения качества поверхности цементно-песчаной черепицы на нее дополнительно наносится специальное покрытие (т.н. «глазурь»), что позволяет устранить шероховатость поверхности, получить более плотную структуру поверхностного слоя, повысить водонепроницаемость и морозостойкость изделий, однако это является дополнительной технологической операцией и повышает стоимость черепицы.

В настоящей работе предложено изготовление цементно-песчаной черепицы высокой прочности и долговечности с высококачественной лицевой поверхностью, не требующей дополнительной обработки, по одностадийной технологии фильтрационного прессования.

**Степень разработанности темы исследования:** Теоретическими основами научного исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых в области структурообразования цементных систем и получения многокомпонентных бетонов с высокими технологическими и эксплуатационными свойствами, представленные в работах Ю.М.Баженова, В.Б.Ратинова, А.Ф.Полака, В.Г.Батракова, П.Г.Комохова, В.В.Бабкова, В.И.Калашникова, С.С.Каприелова и др., а также труды отечественных и зарубежных ученых в области получения строительных изделий по технологии фильтрационного прессования, представленные в работах И.М.Ляшкевича, В.В. Бабкова, И.В.Недосеко.

Однако, в настоящее время недостаточно изученным является вопрос использования технология фильтрационного прессования применительно к цементным системам для изготовления кровельных и облицовочных изделий высокой прочности и долговечности из мелкозернистого бетона.

**Целью работы** является получение цементно-песчаной кровельной черепицы повышенной прочности и долговечности по одностадийной технологии фильтрационного прессования.

Заявленная цель достигалась решением следующих *задач*:

1. Провести теоретическое обоснование возможности получения структур высокой прочности и долговечности на цементно-песчаной основе методом фильтрационного прессования.

2. Теоретически и экспериментально оценить количественное влияние минерального наполнителя в составе сырьевой смеси на изменение структурно-механических характеристик цементно-песчаного композита в условиях приложения прессующего давления.

3. Исследовать основные факторы (состав и свойства бетонной смеси, давление и время прессования), влияющие на процессы структурообразования и твердения пластичных смесей из мелкозернистого бетона при фильтрационном прессовании кровельных и облицовочных изделий.

4. Дать сравнительную оценку характеристик цементно-песчаных композитов, получаемых методом фильтрационного прессования, в сравнении аналогами, изготавливаемыми по традиционным технологиям литья и виброформования. Исследовать структуру образцов из мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, с применением РФА и электронной микроскопии.

5. Разработать с использованием метода фильтрационного прессования низкоэнергоемкую одностадийную технологию производства цементно-песчаной черепицы, и с ее использованием изготовить экспериментальные образцы цементно-песчаной черепицы и оценить их физико-механические и эксплуатационные характеристики.

6. Провести апробацию предложенной технологии, разработать нормативно-техническую документацию (технологическая схема производства, технические условия) на цементно-песчаную черепицу, регламентирующую основные аспекты производства и применения данных изделий.

**Научная новизна исследования:**

1. Систематизированы и обобщены механизмы управления структурой и свойствами цементно-песчаных композитов, обеспечивающие формирование высоких прочностных ( $R_b \geq 50\text{МПа}$ ,  $R_{bt} \geq 5\text{МПа}$ ) и эксплуатационных ( $w_m < 4\%$ ,  $F \geq 300$  циклов) показателей в условиях фильтрационного прессования.

2. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены основные закономерности формирования технологических (подвижность), физико-механических (интегральная и дифференциальная пористость, прочность на сжатие и на растяжение при изгибе) и эксплуатационных (водонепроницаемость, морозостойкость) свойств неармированных и дисперсно-армированных цементно-песчаных композитов в зависимости от количественного соотношения исходных компонентов сырьевой смеси и параметров фильтрационного прессования.

3. Установлено положительное влияние инертного дисперсного наполнителя в виде минерального порошка из карбонатных горных пород или отходов химической промышленности в составе сырьевой смеси на технологические (пластичность, снижение В/Ц и В/Т, повышение степени гидратации) и прочностные характеристики цементно-песчаного композита при изготовлении строительных изделий по технологии фильтрационного прессования.

4. Уточнены аналитические зависимости, связывающие количественные параметры капиллярно-поровой структуры (общая пористость, средний диаметр капиллярных пор) цементно-песчаного композита с содержанием тонкодисперсного инертного наполнителя и степенью гидратации цемента для условий фильтрационного прессования.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении основных закономерностей, связывающих формирование реологических и структурно-механических параметров мелкозернистых бетонов в условиях фильтрационного прессования с количественным составом исходных сырьевых смесей (содержание и гранулометрический состав цемента, инертных наполнителей и заполнителей, процент дисперсного армирования) и характеристиками твердеющих композитов

на цементно-песчаной основе (степень гидратации, параметры интегральной и дифференциальной пористости), а также параметрами технологического процесса (величина и длительность приложения прессующего давления).

**Практическое значение работы** заключается в расширении сырьевой базы производства кровельных изделий на цементно-песчаной основе за счет использования некондиционных мелких песков, отсевов дробления известняков, карбонатных отходов химической промышленности, и разработке одностадийной низкоэнергоемкой фильтр-прессовой технологии изготовления цементно-песчаной черепицы на их основе.

Разработаны и апробированы составы высокоподвижных смесей на цементно-песчаной основе для получения цементно-песчаных кровельных изделий с высокой плотностью, прочностью и гладкой лицевой поверхностью.

Для повышения эффективности технологии фильтрационного прессования при производстве кровельных цементно-песчаных изделий предложен способ отдельно-последовательной подачи в пресс-форму сырьевой смеси двух разных составов: высокоподвижной цементно-песчаной смеси с тонкомолотым минеральным наполнителем и суперпластификатором для формирования лицевой части изделия, и фиброармированной пластифицированной цементно-песчаной смеси с тонкомолотым минеральным наполнителем для формирования остального объема изделия с последующим фильтрационным прессованием изделий.

Предложенная на основе метода фильтрационного прессования пластичных цементно-песчаных смесей одностадийная технология производства кровельной черепицы позволяет обеспечить высокие прочностные и эксплуатационные характеристики получаемых изделий, существенно снизить энергоемкость производственного процесса и удельные капитальные вложения в его организацию, и, соответственно, повысить общую технико-экономическую эффективность выпуска изделий по сравнению с традиционными технологиями производства керамической и цементно-песчаной черепицы.

## **Методология и методы исследования**

Методологической основой диссертационного исследования являются основные положения теории формирования структуры бетонов, имеющих в составе тонкомолотый минеральный наполнитель. Исследования проводились с применением стандартных методов анализа на основе актуальных нормативных документов, действующих на территории Российской Федерации, с использованием современного поверенного исследовательского оборудования. При исследовании структуры мелкозернистого бетона применялись методы рентгенофазового анализа и электронной микроскопии. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена с использованием статистических методов обработки экспериментальных данных.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.5 – Строительные материалы и изделия, п.1 «Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств», и п. 9 «Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья и отходов промышленности».

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния наполнителей различной дисперсности на карбонатной и кварцевой основе на технологические и физико-механические свойства мелкозернистых бетонов.

2. Результаты исследований по определению закономерностей влияния различных технологических факторов (состав цементно-песчаных смесей, давление и длительность процесса прессования) на свойства цементно-песчаных композитов, получаемых по методу фильтрационного прессования.

3. Результаты исследований физико-механических и эксплуатационных свойств композитных систем на цементной основе с тонкодисперсным наполнителем, полученных по методу фильтрационного прессования.

4. Одностадийная технология производства цементно-песчаной черепицы по методу фильтрационного прессования с отдельно-последовательной подачей сырьевой смеси в пресс-форму.

#### **Степень достоверности результатов**

Оценка достоверности результатов диссертационных исследований автора основана на воспроизводимости полученных в аттестованной лаборатории с применением поверенных средств измерения и аттестованного оборудования результатов экспериментальных исследований по определению физико-механических и эксплуатационных характеристик образцов цементно-песчаных изделий, изготовленных по методу фильтрационного прессования. Теоретические зависимости, положенные в основу получения цементных систем повышенной плотности, прочности и долговечности, базируются на основных теоретических положениях структурообразования цементных бетонов и хорошо согласуются с опубликованными по теме диссертации результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов.

#### **Апробация работы.**

Материалы и положения данной научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях, в том числе: Международной НТК, посвященной 105-летию со дня рождения профессора А.Ф.Полака «Вторые Полаковские чтения» (Уфа, 2017г.); XXI Международной НТК «Проблемы строительного комплекса России» (Уфа, 2017г.); Международной 11-й НТК Памяти В.Х.Хамаева (Уфа, 2017г.); 69-й НТК студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2018г.); XXIII Международной НТК «Проблемы строительного комплекса России» (Уфа, 2019г.); XXV Всероссийской НТК «Проблемы строительного комплекса России» (Уфа, 2021г.); XXVI Всероссийской НТК «Проблемы строительного комплекса России» (Уфа, 2022г.), 81-й Всероссийской научно-технической конференции «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» (Самара, 2024г.).

**Внедрение результатов исследований.** На основании результатов исследований, представленных в диссертационной работе:

- получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020663812 от 02 ноября 2020г. «Программа расчета удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц»;

- разработаны ТУ 23.61.11-027-02069450-2024 «Черепица цементно-песчаная плоская ленточная, изготавливаемая по технологии фильтрационного прессования. Технические условия»;

- результаты используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль подготовки «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» в Архитектурно-строительном институте ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

**Публикации по теме работы:** По результатам выполненных исследований опубликованы 14 печатных работ, из них 4 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень научных изданий, рецензируемых ВАК РФ (квартили К1 и К2), и 1 статья в издании, индексируемом в наукометрических базах Scopus (Q3) и Web of Science.

**Личный вклад автора** заключается в поставке целей и задач исследования, разработке программы и выборе методов исследования, определении основных факторов, влияющих на свойства изделий, получаемых методом фильтрационного прессования, определении основных закономерностей изменения физико-механических, строительно-технологических и эксплуатационных свойств цементно-песчаных композитов в зависимости от количественного соотношения компонентов сырьевой смеси и параметров фильтрационного прессования, разработке способа отдельно-последовательной подачи сырьевой смеси в форму с целью изготовления цементно-песчаных кровельных изделий высокой прочности и долговечности по одностадийной технологии фильтрационного прессования, формулировке заключения и основных выводов по диссертационной работе.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работ изложена на 184 страницах машинописного текста, состоит из введения, основной части, включающей 5 глав, заключения, списка литературы из 145 наименований, 3-х приложений, содержит 84 рисунка и 30 таблиц.

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Материалы и изделия для устройства скатных кровель

Из общего количества жилых и общественных зданий, возводимых в последние десятилетия в Российской Федерации, значительную часть составляют здания со скатной кровлей и холодным чердаком [1]. С такой конструкцией крыши строятся преимущественно малоэтажные здания высотой до 5 этажей: многоквартирные жилые дома в малых городах, школы, детские сады, объекты соцкультбыта [2], а также индивидуальные жилые дома, в том числе премиального сегмента [3].

В настоящее время для устройства скатных кровель наиболее распространены следующие виды кровельных материалов и изделий [4, 5]:

- волнистые и плоские асбестоцементные листы (волнистый и плоский шифер);
- металлочерепица;
- профилированные металлические листы (профнастил);
- гибкая (битумная) черепица;
- битумный волнистый лист ондулин (еврошифер);
- композитная черепица;
- керамическая черепица;
- цементно-песчаная черепица;
- полимерпесчаная черепица.

Рассмотрим более подробно преимущества и недостатки каждого из этих кровельных материалов.

**Волнистые и плоские асбестоцементные листы.** Волнистые асбестоцементные листы (волнистый шифер) выпускаются по ГОСТ 30340-95 [6], плоские асбестоцементные листы (плоский шифер) выпускаются по ГОСТ 18124-95 [7].

Асбестоцемент представляет собой композиционный материал, в состав которого входят цемент, асбестовые волокна и, при необходимости, красители на минеральной основе. Добавление к цементу 15% тонковолокнистого асбеста, обладающего высокой прочностью на растяжение, значительно улучшает физико-механические свойства цементного камня [8].

Производство асбестоцементных листов началось в начале 20 века, в 1970-1980 гг. в СССР работало около 60 заводов по производству асбестоцементных изделий, доля шифера в общем объеме производства основных кровельных материалов достигала 55% [9]. Шиферные заводы располагаются в основном в местах производства цемента, т.к. доля асбеста в сырье составляет лишь около 15%. По общему объему производства асбестоцементных изделий и выпуску их на душу населения СССР занимал первое место в мире. Кровля подавляющего большинства кирпичных и панельных пятиэтажных домов первых массовых серий покрыта волнистым шифером. После распада СССР и появления на рынке металлочерепицы и окрашенного кровельного железа объемы производства и потребления шифера значительно сократились. В настоящее время в России работает 12 заводов по производству асбестоцементных изделий [10], освоено производство цветного (объемно-окрашенного шифера), что значительно расширяет возможности внешнего дизайна зданий, покрытых такими листами. Единственная область, где шифер практически не применяется – это строительство индивидуальных жилых домов премиум-класса.



Рисунок 1.1 – Волнистые асбестоцементные листы

Основными достоинствами асбестоцементных листов как кровельного материала являются [11]:

- достаточно высокая прочность;
- простота и удобство монтажа;
- малый нагрев в солнечную погоду (по сравнению с металлочерепицей и профнастилом);
- достаточно высокая долговечность. В России встречаются кровли, на которых шифер, уложенный 60-70 лет назад, успешно эксплуатируется в настоящее время;
- негорючесть (класс НГ);
- не подвержен коррозии (в отличие от металлических покрытий);
- обладает хорошими электроизоляционными свойствами;
- малошумен во время дождя и града;
- относительно невысокая стоимость;
- ремонтпригодность кровли – можно заменить отдельные поврежденные листы.

Недостатки асбестоцементных листов:

- не до конца изученные вопросы безопасности для здоровья человека;
- достаточно большой вес (при толщине 4-6мм) по сравнению с металлической кровлей;
- относительно хрупок, требует осторожного обращения при транспортировке и установке;
- со временем из-за негладкой (шероховатой) структуры покрывается водорослями и мхом. Данный недостаток устраняется обработкой проникающими антисептическими грунтовками, попутно повышая долговечность кровли.

**Металлочерепица** – в настоящее время в РФ самый популярный материал для скатных кровель, занимает от 60 до 70% рынка [12]. Металлочерепица представляет собой крупноразмерные листы, изготовленные из оцинкованного рулонного металлического тонколистового проката толщиной 0,4-0,5мм с цветным защитно-декоративным полимерным покрытием, профилированные

методом холодного давления. [13]. Такую сталь изготавливают крупные металлургические заводы, а производители готовой продукции – металлочерепицы и профнастила – на местных заводах методом холодного давления придают металлу нужный профиль. Долговечность черепицы напрямую зависит от качества исходного сырья – оцинкованной стали с полимерным покрытием [14].

Крепление металлочерепицы осуществляется к дощатой обрешетке при помощи кровельных саморезов – специальных крепежных элементов, изготовленных из стали с цинковым покрытием и оснащенных шайбой с EPDM-прокладкой (специальным резиновым уплотнителем) [15]. Резку листов металлочерепицы следует производить с применением специальных ножниц, использовать для этих целей болгарку с алмазным диском не следует, т.к. она повреждает полимерное и цинковое покрытие и металлическая основа без защиты от коррозии будет подвержена коррозии [14].



Рисунок 1.2 – Фрагмент кровли из листов металлочерепицы

Основные достоинства металлочерепицы [15]:

- привлекательный внешний вид;
- простота и удобство монтажа;
- высокая долговечность (при условии соблюдения технологии монтажа);
- небольшой вес, что позволяет снизить нагрузку на стропильную систему и на стены здания;

- относительно невысокая стоимость.

Недостатки металлочерепицы:

- группа горючести Г1 (за счет полимерного покрытия);
- вопросы стойкости полимерного покрытия к УФ-излучению;
- повышенная шумность при дожде (требуется звукоизоляция);
- значительное количество отходов при устройстве кровель сложной формы.

**Профнастил** (профилированный лист) – представляет собой металлический лист, изготавливаемый из листовой оцинкованной стали, поставляемой с металлургических комбинатов, методом холодного проката на профилегибочных станках. Профилирование (придание волнообразного, трапециевидного и др. профиля) производится для повышения жесткости изделия. Профнастил может применяться с цветным полимерным покрытием (как и металлочерепица) или без дополнительного покрытия [14].



Рисунок 1.3 – Кровля из листов профнастила

Достоинства и недостатки профнастила – в основном те же, что и для металлочерепицы [15]. Стоимость кровельного профнастила несколько ниже стоимости металлочерепицы.

**Гибкая черепица** (битумная черепица) – кровельный материал на основе стеклохолста, модифицированного битума и каменной посыпки (гранулята) [16]. Битумная черепица является штучным материалом (стандартные размеры 1000×300мм), что позволяет применять ее на кровлях любой сложности.

Производство гибкой черепицы началось в США в 1903 году. Этот материал быстро завоевал популярность, и к середине XX века в США гибкой черепицей было покрыто до 40% частных домов [17]. В России битумная черепица появилась с середины 1990-х гг., однако по степени распространенности значительно уступает профнастилу и металлочерепице. Основные формы нарезки мягкой черепицы: бобровый хвост, драконий зуб, драмка, кирпич, прямоугольная, ромб, шестигранник (наиболее распространен) [18].



Рисунок 1.4 – Варианты нарезки гибкой черепицы



Рисунок 1.5 – Кровля из битумной черепицы

Достоинства гибкой черепицы [18]:

- разнообразие форм и расцветок;
- достаточно высокая прочность на разрыв;
- возможность обеспечить качественную гидроизоляцию кровель сложной конфигурации;
- малый вес и габариты;

- простота и малоотходность монтажа, в том числе на сложных типах кровли;
- бесшумность под дождем и градом.

Основными недостатками битумной черепицы являются следующие:

- в силу наличия органического связующего битумная черепица относится к горючим материалам, также остается открытым вопрос ее долговечности при действии ультрафиолетового излучения;

- достаточно высокая стоимость устройства кровли, т.к. при монтаже битумной черепицы используется сплошное основание из влагостойкой фанеры или доски. На сегодняшний день стоимость комплекта материалов для устройства кровли из мягкой черепицы выше, чем для металлочерепицы, но ниже по сравнению с кровлей из керамической черепицы [19].

### **Битумный волнистый лист (еврошифер) Ондулин.**

Производство битумных волнистых листов (еврошифера) Ондулин началось во Франции после второй мировой войны [13]. В России завод «Ондулин» был построен в Нижегородской области в 1994 году. Ондулин внешне похож на волнистый шифер, но в отличие от шифера, который состоит из цемента и асбеста, ондулин состоит из целлюлозы с минеральной пропиткой и битумным покрытием. По сравнению с шифером ондулин имеет меньший вес и большую гибкость, что упрощает процесс монтажа, химическую и биологическую стойкость, возможность устройства нового кровельного покрытия поверх существующего (например, старого шифера), а также не содержит потенциально вредных для человека асбестовых волокон [20]. Недостаток ондулина – его воспламеняемость и горючесть, что ограничивает его применение на социальных объектах. Также применение ондулина по причине его большей гибкости требует более частого шага обрешетки. Также к недостаткам битумных волнистых листов можно отнести более высокую стоимость по сравнению с обычными волнистыми асбестоцементными листами.



Рисунок 1.6 – Битумный волнистый лист (еврошифер) Ондулин

**Композитная черепица** – многослойное кровельное покрытие, в основе которого оцинкованные стальные листы, на которые нанесена акриловая грунтовка, поверх которой выполнена посыпка из гранулированной базальтовой крошки, на которую нанесена акриловая защитная пленка [21].



Рисунок 1.7 – Композитная черепица

Достоинства композитной черепицы [22]:

- долговечность;
- меньший вес, чем у керамической черепицы;
- высокая шумоизоляция;
- широкая цветовая гамма;
- срок службы более 50 лет (заявленный производителем).

К недостаткам композитной черепицы можно отнести группу горючести Г1 (за счет наличия полимерного покрытия), а также (как и для металлочерепицы) значительное количество отходов при устройстве кровель сложной формы [22]. Стоимость композитной черепицы выше стоимости металлочерепицы и гибкой черепицы, однако ниже стоимости керамической черепицы.

### **Керамическая черепица**

Керамическая черепица изготавливается из природного глинистого сырья, обладает высокой прочностью, атмосферостойкостью и морозостойкостью и в настоящее время считается самым долговечным кровельным материалом. Достоинствами керамической черепицы также являются её декоративные свойства, которые сохраняются в течение длительного времени, огнестойкость и отсутствие шума во время дождя [23].

К условному недостатку керамической черепицы можно отнести её значительный вес, что приводит к увеличению материалоемкости и удорожанию стропильных конструкций. Основным фактором, препятствующим более широкому применению керамической черепицы, является её достаточно высокая стоимость, которая определяется высокими требованиями к глинистому сырью и достаточно сложной и энергоемкой технологией изготовления изделий [15].

Точные данные о времени и месте появления керамической черепицы отсутствуют. Первые письменные упоминания о применении керамической черепицы в странах Междуречья (Вавилоне) и в Китае относятся к 3 тысячелетию до нашей эры, что подтверждается археологическими находками. Массовое распространение кровельная черепица получила в странах Античности – на территории Греции и в Римской Империи [23]. В настоящее время в Европейских странах кровли зданий, выполненные из керамической черепицы, эксплуатируются без ремонта 200-250 лет и более [23].



Рисунок 1.8 – Скатные крыши исторических зданий в городе Прага выполнены из керамической черепицы

В России керамическая черепица долгое время по причине высокой стоимости практически не применялась, а поэтому и не производилась, а при необходимости привозилась в небольших объемах из стран Европы. Начало производства керамической черепицы в России относится к середине 19 века, заводы располагались преимущественно в южных районах страны [24]. В СССР при нескольких заводах керамического кирпича, расположенных преимущественно на территории Украины и Прибалтики, имелись вспомогательные технологические линии по производству керамической черепицы [24], однако стране, в которой подавляющее большинство зданий строились в основном по типовым проектам (максимально экономичным), требовались дешевые материалы для массового строительства, в связи с чем дорогая керамическая черепица выпускалась в минимальных объемах.

Увеличение объемов потребления керамической черепицы произошло в 1990-х годах в связи с резким увеличением объемов индивидуального жилищного строительства, при этом керамическая черепица занимает сегмент элитного кровельного материала. Объемы продаж керамической черепицы в Российской Федерации по состоянию на 2008 год оценивалось порядка 600 тысяч квадратных метров в год [25]. Основной объем керамической черепицы, реализуемый на

рынке Российской Федерации, поставляется из-за рубежа, преимущественно из Германии, а также из Польши, Чехии, Венгрии, Франции, Италии, Испании. Крупнейшими производителями являются компании Nelskamp (Германия), Meyer-Holsen (Германия), BRAAS (Германия, помимо керамической, выпускает также цементно-песчаную черепицу), La Escandella (Испания), Terreal (Франция), Cottosenese (Италия), Roben (Польша). Объем производства керамической черепицы в Российской Федерации достаточно небольшой, и в целом по объему продаж значительно уступает импорту [25].

В зависимости от состава глин и режима обжига цвет керамической черепицы может изменяться от кирпично-красного до желто-серого. В зависимости от вида покрытия черепица бывает натуральная (без дополнительного покрытия), либо, в целях улучшения внешнего вида и качества поверхности (рисунок 1.9), черепицу иногда покрывают цветной глазурью [26].



а) глазурованная



б) глазурованная



в) неглазурованная

Рисунок 1.9 – Керамическая черепица

Технологический процесс изготовления керамической черепицы состоит из трех основных этапов:

- формование глиняной заготовки требуемых размеров и формы;
- нанесение на лицевую поверхность декоративного покрытия (ангоба или глазури), за исключением варианта неглазурованной черепицы;
- обжиг в печи при температуре около 1000°C [26].

Достоинствами керамической черепицы являются [27]:

- высокая долговечность (срок службы – 100 лет и более);
- эстетичность (привлекательный внешний вид);
- негорючесть и огнестойкость;
- экологичность (производится из природного глинистого сырья);
- инертность к биологическим воздействиям;
- бесшумность во время непогоды;

Недостатки керамической черепицы:

- хрупкость;
- сравнительно большой вес (до 60 кг/м<sup>2</sup>);
- нужен достаточно крутой скат кровли (желательно более 25°);
- самая высокая стоимость из всех вариантов кровельных покрытий для скатной крыши, т.к. требует для производства качественное глинистое сырье и значительных затрат на обжиг.

### **Цементно-песчаная черепица**

Внешне цементно-песчаная черепица похожа на керамическую, но производится из широко распространенных материалов - цемента, песка и воды с добавлением натуральных красителей (пигментов). Приготовленная цементно-песчаная смесь с добавлением красителей-пигментов либо укладывается в пресс-формы на поддоне и уплотняется методом вибропрессования, либо изделия формируются методом вибропрокатки на специальных конвейерах [28]. После изготовления изделия помещаются для термовлажностной обработки в пропарочную камеру для обеспечения ускоренного набора прочности. Цементно-песчаная черепица, в отличие от керамической, не требует энергоемкого

высокотемпературного обжига, что позволяет изготавливать ее со значительно меньшими затратами на производство.

Из достоинств цементно-песчаной черепицы следует отметить [29]:

- эстетичный внешний вид, широкая цветовая гамма;
- надежность и долговечность (срок службы более 50 лет);
- негорючесть и огнестойкость;
- экологическая безопасность;
- бесшумность при дожде.

Недостатки цементно-песчаной черепицы:

- относительно большой вес, что требует более мощных строительных конструкций. Однако это же делает кровлю из цементно-песчаной черепицы более устойчивой к ветровым нагрузкам;

- хрупкость – требует аккуратного обращения при транспортировке и укладке. Сделать черепицу менее хрупкой позволяет добавление в её состав полипропиленовой или базальтовой фибры;

- шероховатая поверхность, на которой возможно образование мха, требует периодической очистки механическим или химическим способом;

- возможно постепенное изменение цвета из-за загрязнения поверхности и биологической коррозии.

Получаемые цементно-песчаные кровельные изделия имеют достаточно высокую прочность, однако значительным недостатком является их шероховатая поверхность, на которой забивается в неровности и задерживается пыль, грязь, отходы жизнедеятельности птиц, поселяются лишайники и мхи, в результате чего требуется периодическая очистка поверхности кровли механическим или химическим способом. Также шероховатая поверхность задерживает снег на кровле. Для улучшения качества поверхности цементно-песчаной черепицы после ее термовлажностной обработкой на поверхность черепицы дополнительно наносится специальное покрытие (производители называют его «глазурь»), что позволяет устранить шероховатость поверхности, получить более плотную структуру материала, улучшить внешний вид изделия, повысить его

водонепроницаемость и морозостойкость, однако это является дополнительной технологической операцией и повышает стоимость черепицы [28]. Цементно-песчаная черепица с покрытием «глазурью» по физико-механическим и эксплуатационным свойствам практически не уступает керамической черепице.

Производство цементно-песчаной черепицы началось в Европе в 1950-х гг. [30]. Основными производителями являлись крупные заводы, которые к этому моменту выпускали керамическую черепицу, в частности, форма «Braas» (Германия), который является одним из лидеров на рынке керамической и цементно-песчаной черепицы в Европе и одним из основных поставщиков черепицы на рынок России. Фирма «Braas» начала производство цементно-песчаной черепицы в 1954 г., и к 1970-м годам прочно заняла лидирующие позиции на рынке Германии [30], однако по качеству цементно-песчаная черепица долгое время уступала керамической. Ситуация изменилась с начала 1980-х гг., когда широкое распространение получили суперпластифицирующие добавки, позволяющие при одинаковой удобоукладываемости смеси получить более плотную структуру бетона, а, следовательно, меньшую проницаемость и большую долговечность изделий. В настоящее время цементно-песчаная черепица крупных европейских производителей по качеству ненамного уступает керамической [31], однако за счет более простой технологии значительно дешевле.

В 1995 году фирма «Braas» открывает совместное предприятие по выпуску цементно-песчаной черепицы на основе Московского домостроительного комбината (ДСК-1). Спустя 10 лет второй завод по производству цементно-песчаной черепицы «Braas» открылся в Ставропольском крае [30]. Цветовая гамма цементно-песчаной черепицы «Braas» представлены на рисунке 1.10, технические характеристики – на рисунке 1.11.

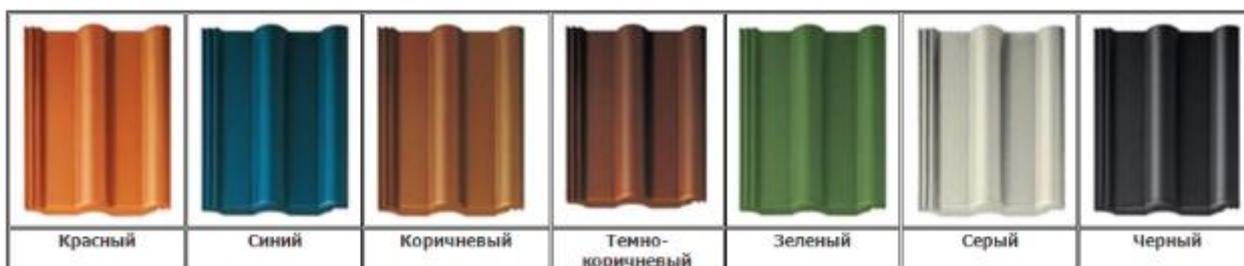


Рисунок 1.11 – Цветовая гамма цементно-песчаной черепицы «Braas» [32]



Рисунок 1.10 – Технические характеристики цементно-песчаной черепицы «Braas» (по данным [32])



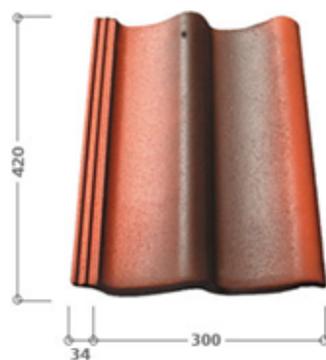
Рисунок 1.12 – Примеры кровли из цементно-песчаной черепицы производства концерна «Braas» (Германия) (по данным [32])

В России производство цементно-песчаной черепицы под торговой маркой «Sea Wave» в 2002 году начала компания «Балтик Тайл» (г. Санкт-Петербург) [33]. Для её производства используются отечественные цемент и песок и импортные красители. Форма черепицы спроектирована таким образом, чтобы

вода, снег и наледь не задерживались на поверхности и соскальзывали с поверхности черепков. Срок службы данной черепицы определяется производителями не менее 100 лет.



Рисунок 1.13 – Цветовая гамма цементно-песчаная черепица «Балтик Тайл»



Размеры: 334x420 мм  
 Строительная длина: 345 мм  
 Строительная ширина: 300 мм  
 Допустимый уклон: от 12 градусов  
 Шаг обрешетки: 32,0 – 37,5 см  
 Расход: 9,5 шт./м<sup>2</sup>  
 Вес: 4,3 кг/шт.  
 Гарантия: 35 лет  
 Срок службы: 100 лет

Рисунок 1.14 – Технические характеристики цементно-песчаной черепицы «Балтик Тайл»

Цементно-песчаная черепица «Балтик Тайл» выпускается в трех вариантах по качеству исполнения, цветовой гамме и по стоимости [33]:

- экономичный вариант (без красителей либо с дешевым красным красителем);
- стандартные цвета;
- эксклюзивные цвета (под заказ).

**Полимерпесчаная черепица** – это современный кровельный материал, в состав которого входит песок и полимеры. Полимерпесчаная черепица является аналогом керамической черепицы и цементно-песчаной черепицы, однако имеет

ряд отличий по физико-механическим и эксплуатационным характеристикам из-за применения в составе полимерных материалов и особенностей технологии производства [34]. В состав полимерпесчаной черепицы входят: кварцевый песок – 70%, связующий полимер (полипропилен, полистирол) – 30%, минеральный пигмент – менее 1%. Фактически, вместо цементного связующего, применяемого при производстве цементно-песчаной черепицы, в полимерпесчаной черепице используется полимерное связующее.

Габариты полимерпесчаной черепицы близки к габаритам керамической и составляют 305×400мм, укладочные размер (полезная площадь) - 285×345мм. Толщина полимерпесчаной черепицы – 10мм, плотность – 1700кг/м<sup>3</sup>, масса одного элемента – 2,1 кг. Прочность на сжатие ниже, чем у керамической и цементно-песчаной черепицы и составляет около 15 МПа, зато прочность на изгиб более высокая – около 10 МПа. Срок эксплуатации черепицы оценивается в 30 лет [34].

Выпускаются следующие элементы полимерпесчаной черепицы [35]:

- рядовая черепица – прямоугольные элементы черепицы, используемые для непосредственного покрытия площади крыши. Имеют идентичные размеры и боковые замки, что позволяет осуществлять скрепление деталей с целью предотвращения протекания при осадках и укрепления конструкции. Отверстия для крепления располагаются в верхней части элемента, также на тыльной стороне черепицы имеются зацепы, позволяющие упростить процесс монтажа;

- коньковые элементы – используются при монтаже стыков поверхности крыши;

- ветровые элементы – доборные элементы, декорирующие кровлю и скрывающие внутренние слои утеплителя. Выполняют защитную функцию, предотвращая задувание ветра под черепицу и попадание влаги в чердачное пространство.

Технология производства полимерпесчаной черепицы следующая. Компоненты состава нагревают до высоких температур и перемешивают в закрытом пространстве с ограниченной подачей воздуха. В результате этого

процесса каждый фрагмент заполнителя (каждая песчинка) обволакивается в полимерную пленку (по аналогии с цементным камнем). Объемное окрашивание черепицы осуществляется путем введения минеральных пигментов на этапе перемешивания смеси. Готовая полимерпесчаная масса прессуется на специальном станке. Штамповочный метод производства позволяет обеспечить высокую точность размеров производимого продукта, что позволяет значительно упростить и облегчить процесс монтажа кровли. Использование полимеров позволяет обеспечить высокую плотность материала и избежать излишней хрупкости [36].

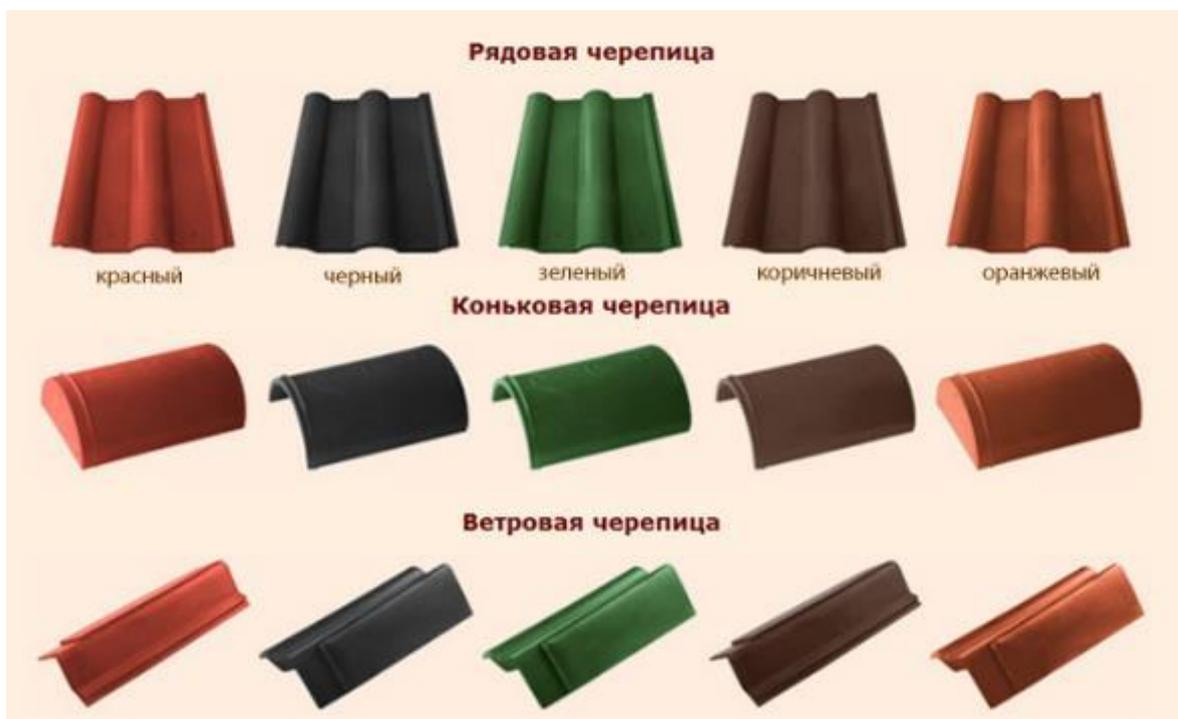


Рисунок 1.15 – Разновидности полимерпесчаной черепицы

Достоинства полимерпесчаной черепицы:

- широкий выбор цветовых решений и формы;
- высокий уровень точности изготовления изделий;
- плотная структура, за счет чего достигается очень высокая водонепроницаемость и морозостойкость;
- меньшая хрупкость по сравнению с керамической и цементно-песчаной черепицей, что снижает риск повреждений при транспортировке и монтаже;

- меньший вес по сравнению с керамической и цементно-песчаной черепицей (около 22 кг/м<sup>2</sup>, т.е. примерно в 2 раза легче керамической);
- достаточно высокая долговечность (30-50 лет);
- простота производства и доступность сырьевых материалов;
- высокий уровень шумоизоляции;
- диэлектрические свойства материала;
- отсутствие рисков коррозии;
- негорючесть;
- более низкая стоимость относительно керамической черепицы, сравнивая со стоимостью цементно-песчаной черепицы.

Значительным недостатком цементно-песчаной черепицы является вопрос стойкости полимерного связующего под действием ультрафиолетового излучения, что может привести к разрушению поверхности материала. Также недостатком можно считать относительно большой вес (относительно шифера, металлочерепицы и т.д.).

Полимерпесчаная черепица производится рядом относительно небольших предприятий на территории РФ [35], выпускающими по той же технологии и другие виды продукции: бордюры, колодезные люки и т.д.

## **1.2 Нормативная база производства керамической и цементно-песчаной черепицы**

В настоящее время В Российской Федерации действует ГОСТ Р 56688-2015 «Черепица керамическая. Технические условия» [37], который регламентирует требования к черепице, в т.ч. номенклатуру выпускаемой продукции. Внешний вид различных видов керамической черепицы представлен в Приложении А к ГОСТ Р 56688-2015, рекомендуемые габаритные и кроющие (полезные) размеры черепицы – в таблице Б.1 приложения Б ГОСТ Р 56688-2015.

Керамическую черепицу изготавливают следующих видов:

- пазовая штампованная (пазовая);

- желобчатая (S-образная, называется также голландская, монастырская или римская);

- «монах»-«монашка»;

- коньковая;

- плоская ленточная («бобровый хвост»).

Основные виды цементно-песчаной черепицы представлены на рисунке 1.16. Также существует специальная черепица, которая используется не массово, а для каких-либо специальных нужд: торцевая, вентиляционная, подконьковая, фронтовая, вальмовая, Т-образная и другие.

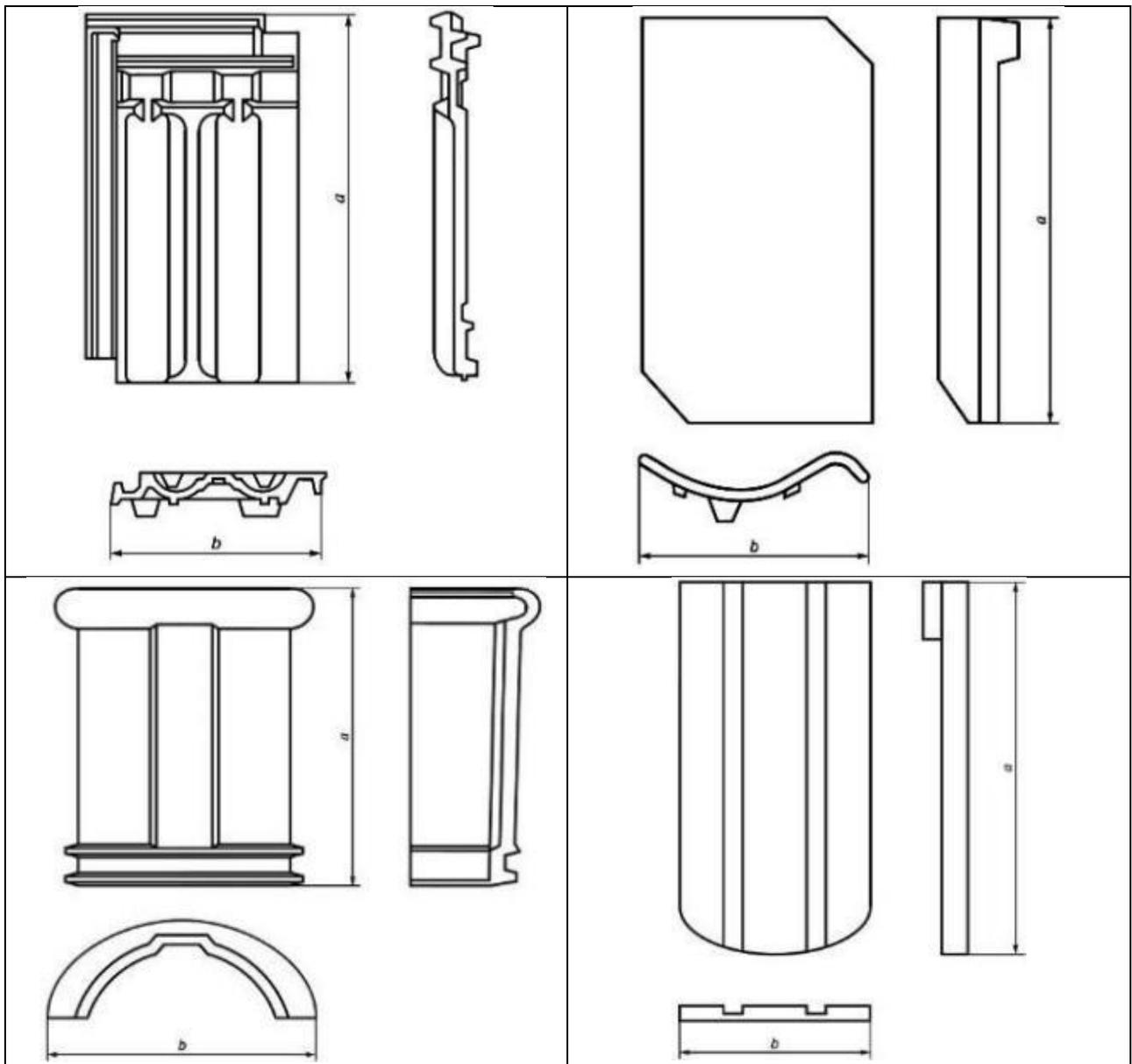


Рисунок 1.16 – Виды цементно-песчаной черепицы: а – пазовая двухфальцевая, б – s-образная; в – коньковая, г – плоская ленточная

В Европейском союзе производство и применение керамической черепицы регламентируется стандартом EN 1304:2013 [38]. Номенклатура продукции в нем в целом близка к российскому стандарту ГОСТ Р 56688-2015.

На цементно-песчаную черепицу в СССР действовал ГОСТ 7487-55\* «Черепица цементно-песчаная» [39] (в настоящее время отмененный). Согласно ему, цементно-песчаная черепица выпускалась трех видов:

- пазовая с двумя боковыми закраями и двумя-четырьмя шипами;
- пазовая с двумя боковыми закраями, одним поперечным гребнем и двумя-четырьмя шипами;
- коньковая.

В настоящее время национальным кровельным союзом разработан Предварительный национальный стандарт Российской Федерации ПНСТ 545-2021 «Черепица цементно-песчаная. Технические условия» [40]. Данным документом требования к конкретным формам и размерам черепицы не предусмотрены, указаны только основные виды цементно-песчаной черепицы:

- пазовая (замковая) волнистая черепица;
- пазовая (замковая) плоская черепица;
- беспазовая плоская черепица.

В целом основные разновидности форм цементно-песчаной черепицы такие же, как и у черепицы керамической: классическая, волнообразная, S-образная, «бобровый хвост», плоская (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 – Разновидности цементно-песчаной черепицы

Боковые замки (накрывающий и нижний) пазовой цементно-песчаной черепицы обеспечивают качественное и герметичное поперечное соединение черепиц при укладке, с помощью зацепов каждая черепица зацепляется за доски обрешетки, а закругленные края пазовой черепицы обеспечивают свободный сток дождевой и талой воды с кровельного покрытия [40]. Для беспазовой черепицы герметичность кровельного покрытия обеспечивается значительным нахлестом верхнего ряда над нижним и расположением черепиц в горизонтальных рядах со смещением относительно нижележащего ряда (в шахматном порядке).

### **1.3 Технологические особенности производства цементно-песчаной черепицы**

Как известно [9, 41], для производства штучных строительных изделий из мелкозернистого бетона (стеновых, кровельных, облицовочных) применяются несколько основных технологий:

- формование на ручных станках;
- вибролитьевая технология;
- вибрационное прессование;
- гиперпрессование;
- вибропрокатка;
- вибровакуумирование;
- фильтрационное прессование.

Рассмотрим перечисленные выше технологии применительно к возможности производства цементно-песчаной черепицы.

**Формование на ручных станках**, при котором на станке формуют каждую черепицу в отдельности, является устаревшей технологией, которая широко применялась до середины 20 века, особенно на небольших производствах.

Конструкция ручных станков позволяет формовать черепицу с поперечным ветровым шипом (замком), с любым видом крепления к обрешетке и с хорошо заглаженными кромками [28]. Основным недостатком формования черепицы на ручных станках является их невысокая производительность (не превышает 500-

600 черепиц в смену) и необходимость вручную выполнять ряд трудоемких операций. В связи с вышеизложенным, технология формования на ручных станках для изготовления цементно-песчаной черепицы в настоящее время не применяется.

**Вибролитьевая технология** заключается в заливке (укладке) бетонной смеси в металлические формы с её последующим уплотнением под собственным весом при действии вибрации (с использованием вибростолов или виброплощадок), при этом бетонная смесь должна обладать достаточной подвижностью. Применение вибролитьевой технологии позволяет получить бетонные изделия достаточно высокой прочности, однако по причине высокого водоцементного отношения, необходимого для обеспечения удобоукладываемости смеси (ранее В/Ц составляло 0,45-0,5, в настоящее время при применении суперпластифицирующих добавок оно снизилось до 0,32-0,38) изделия и конструкции, изготовленные по данной технологии, обычно имеют достаточно высокую пористость, что может привести к их пониженной морозостойкости. Данная технология обычно рекомендуется для изготовления бетонных изделий и конструкций, работающих в относительно сухих условиях без периодического замачивания. Из преимуществ вибролитьевой технологии следует отметить низкие энергозатраты, из недостатков – большой объем ручного труда, связанного с распалубкой изделий, очисткой, смазкой и повторной сборкой форм [42], а также невозможность изготовления изделий сложной геометрической формы, к которым относится цементно-песчаная черепица.

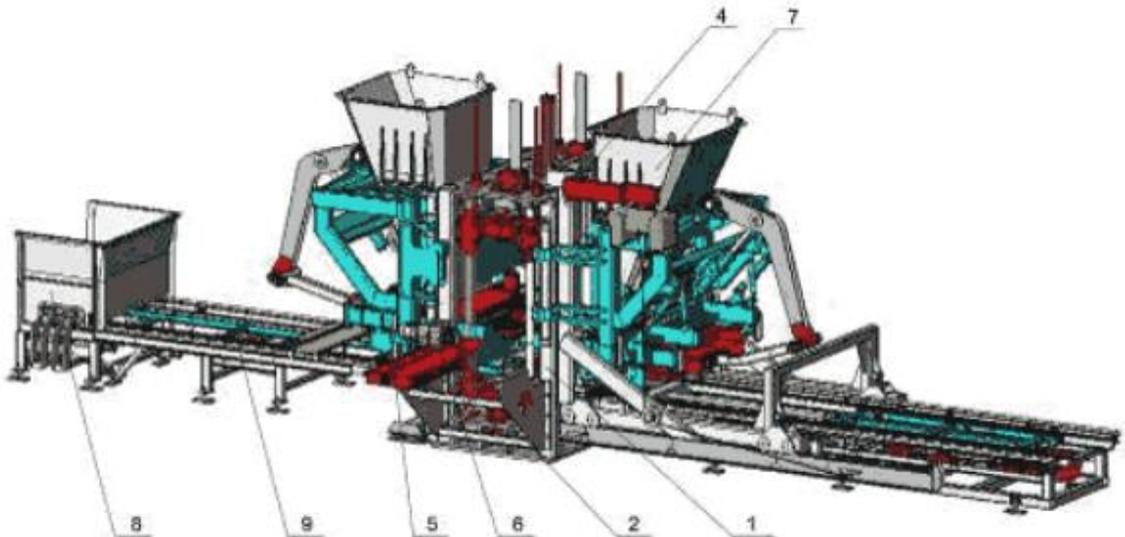
**Технология вибропрессования** состоит в уплотнении уложенной в пресс-форму «жесткой» бетонной смеси при одновременном воздействии вибрации и давления [43]. По данной технологии изготавливают в основном изделия небольшого размера – стеновые камни, тротуарная плитка и т.д. При вибропрессовании используется т.н. «полусухая» бетонная смесь, т.е. жесткая бетонная смесь с пониженным содержанием воды затворения. При формировании плитки задействованы два основных элемента вибропресса – матрица (пресс-форма) и пуансон (зеркальное отражение пресс-формы). На поверхность пуансона

нанесен рисунок, который должен быть на лицевой стороне изделия, а матрица формирует стенки изделия.

Технология вибропрессования состоит в следующем [44]. Приготовленный «полусухой» мелкозернистый бетон (с добавлением или без добавления красителя) засыпается в установленную на технологический поддон матрицу и частично уплотняется под воздействием кратковременной вибрации. Затем опускается пуансон и в течение примерно 20 секунд формируются бетонные изделия при давлении 10-15 МПа в сочетании с вибрацией. Затем пуансон и матрица поднимаются, оставляя на виброплощадке технологический поддон с отформованными изделиями. После завершения процесса формования поддон с готовыми изделиями перемещается в пропарочную камеру, а на его место подается следующий поддон и операция повторяется. В пропарочной камере отформованные изделия проходят термовлажностную обработку при температуре 50-60°C в течение 6-8 часов, после остывания и высыхания происходит упаковка изделий и готовая продукция отгружается потребителю. Общий вид технологической линии по изготовлению бетонных изделий по технологии вибрационного прессования представлен на рисунках 1.18 и 1.19. По данной технологии могут производиться как объемно окрашенные цветные изделия, так и двухслойные изделия, у которых нижний слой выполнен из обычного бетона, а верхний слой имеет объемное окрашивание.



Рисунок 1.18 – Вибропресс производства ООО «Златоустовский вибропресс»



*1 – станина, 2 – вибростол, 3 – траверса матрицы, 4 – траверса пуансона, 5 – система основного бетона, 6 – выдвижные щитки, 7 – система облицовочного бетона, 8 – накопитель технологических поддонов, 9 – транспортер шаговый*

Рисунок 1.19 – Технологическая схема вибропресса

Метод полусухого вибропрессования высокотехнологичен и высокопроизводителен – современные вибропрессы для небольших производств (например, производства ООО «Завод Златоустовский вибропресс») позволяют одновременно формовать от 3 до 9 бетонных стеновых блоков, и изготавливать от 300 до 900 блоков в час [45]. Значительно большую производительность имеет оборудование, применяемое на крупных заводах. В частности, широкую номенклатуру бетонных изделий (бетонный кирпич, тротуарную плиту, бордюрные камни и т.д., рисунок 1.20) по технологии вибрационного прессования на оборудовании немецкой фирмы «Masa Henke» выпускает расположенное в Уфимском районе Республики Башкортостан АО «ГлавБашСтрой» [46].



Рисунок 1.20 – Плитка тротуарная производства АО «ГлавБашСтрой»

Технология вибропрессования позволяет получать изделия достаточно высокой прочности (класс бетона В25 - В35) и морозостойкости. Энергоемкость производства бетонных изделий по технологии вибрационного прессования выше, чем по вибролитевой технологии, но в несколько раз более высокая производительность технологического вибропрессового оборудования и меньший расход цемента выше делает данную технологию экономически более выгодной [47]. Однако в силу особенности технологии (применения полусухой бетонной смеси), изделия, изготовленные методом вибропрессования имеют пористую структуру, высокую водопроницаемость и шероховатую поверхность. Наличие шероховатой поверхности является преимуществом для выпускаемой по данной технологии тротуарной плитки в случае, когда необходимо получить плитку с нескользкой поверхностью, но является значительным недостатком для кровельных изделий.

**Технология гиперпрессования** основывается на уплотнении полусухой мелкозернистой бетонной смеси ( $V/C = 0,2 \dots 0,25$ ) при высоком давлении, равном 40-50 МПа, при этом происходит максимально возможное сближение частиц цемента и песка между собой и образуется очень плотная структура мелкозернистого бетона с высокой прочностью (класс бетона по прочности на сжатие от В30 до В45). Технология гиперпрессования позволяет изготавливать широкую номенклатуру неокрашенных либо объемно-окрашенных бетонных изделий – стеновые блоки, бетонный кирпич, тротуарную плитку, дорожные и тротуарные бордюры и др. [48]. Наиболее крупным производителем оборудования для гиперпрессования в России является ООО «Титан-Машинери Россия» [49].

Технология гиперпрессования позволяет получать бетонные изделия с плотной структурой, следствием чего является их высокая прочность и морозостойкость. Так, прочность бетона стеновых изделий и тротуарной плитки, изготавливаемых ООО «Новобрикс» (г. Белорецк, Республика Башкортостан), соответствует классу по прочности на сжатие В40 (М500) [50]. Другим значительным преимуществом данной технологии является пониженный расход

цемента (не более 200 кг), а также возможность использования в качестве заполнителя дешевые материалы либо отходы - мелкий песок, отсеvy дробления известняка, доломита, гранита, шлаки, золу, измельченные продукты утилизации железобетонных конструкций и другие отходы [51].

Технологический процесс производства гиперпрессованных изделий состоит из следующих этапов [52]:

- подготовка сырья и приготовление бетонной смеси. Заполнитель просеивается с целью удаления зерен крупнее 5мм, после чего по транспортеру подаются в смеситель, в который также добавляется цемент, вода и красящий пигмент. Всё дозирование происходит автоматически;

- готовая масса перегружается в ковш подъемника и поступает в бункер прессы;

- формовка и прессование кирпича длится 8-10 секунд. При технологии гиперпрессования происходит двухсторонне прессование сырьевой массы в пресс-формах с давлением не менее 40 МПа. Готовые изделия по ленточному транспортеру перемещаются к месту складирования и укладываются на поддоны. Линия полностью автоматизирована, за работой всех узлов наблюдает и руководит процессом оператор.

Готовые изделия за счет высокой степени уплотнения сразу после изготовления имеют значительную прочность (до 20 МПа). После изготовления изделия либо помещаются в пропарочную камеру, где в течение 12 часов набирают 70-80% от проектной прочности, либо выдерживаются в течение 5-7 дней в отапливаемом складском помещении и за это время набирают не менее 70% от проектной прочности.

В целом, гиперпрессованные изделия имеют высокую прочность и морозостойкость, но при этом имеют достаточно высокую стоимость за счет стоимости оборудования и расхода энергии на прессование [52].

**Технология вибровакуумирования** состоит в сочетании при изготовлении бетонных изделий процессов вибрирования и вакуумирования. В процессе вибрирования на поверхности бетонного изделия или конструкции в случае

применения текучей бетонной смеси выделяются излишки воды, которые удаляются методом вакуумирования, т.е. путем воздействия на поверхность бетона вакуум-насосом, что позволяет значительно повысить прочность и долговечность бетона [53]. Метод вибровакуумирования эффективен только для пластичных бетонных смесей и получил некоторое распространение в 1960-1970-х гг. [54]. Недостатком данной технологии является длительность процесса – от 1,5 до 2 минут на каждый сантиметр толщины изделия, поэтому вакуумирование применялось в основном для придания высокой плотности поверхностному слою конструкций. В дальнейшем с появлением суперпластифицирующих добавок, применение которых позволяет понизить количество воды затворения со значительно меньшими затратами, данная технология перестала применяться.

**Технология прокатки и вибропрокатки** представляет собой изготовление изделий методом непрерывного формования на конвейерных вибропрокатных станках путем непрерывного протягивания кассет, заполненных цементно-песчаной массой, под укрепленными на станине механизмами. Вибропрокатный стан, являющийся основой технологической линии, состоит из непрерывно движущейся металлической ленты, смонтированной на стальной станине, снабженной специальными приводными механизмами [9]. В процессе движения ленты на нее специальным распределительным устройством, снабженным дозатором, подается из бетоносмесителя непрерывного действия бетонная смесь, которая распределяется шнеком по всей ширине ленты, разравнивается и уплотняется вибробрусом через формирующую ленту. Далее при движении формовочной ленты изделие калибруют по высоте путем проката специальными валками до проектной толщины, после чего изделия поступают на участок термообработки.

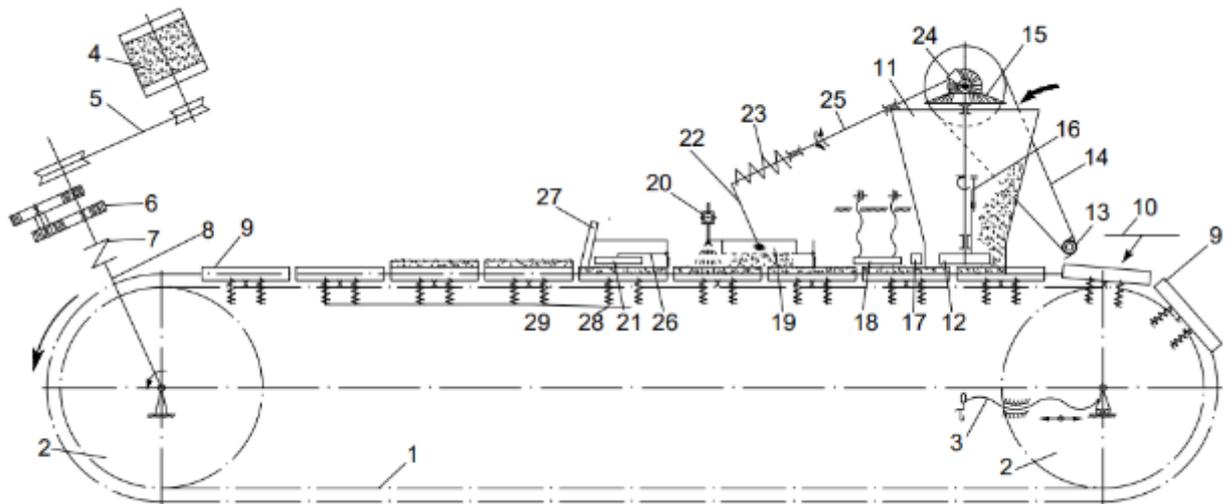
С учетом более сложной формы черепицы в сравнении с большинством железобетонных изделий производство черепицы на конвейерных станках по технологии вибропрокатки имеет свои особенности [28]. К бесконечной цепи конвейера (поз. 1) прикреплены кассеты (поз. 9), а в них укладываются поддоны

(поз. 10), на которых производится формование черепицы (рисунок 1.24). В каждой кассете размещается один поддон, и, следовательно, в каждой кассете формируется одна черепица. Цепь конвейера и кассеты на ней непрерывно движутся вдоль машины, а все механизмы, осуществляющие формование черепицы, жестко укреплены на станине и расположены над этим конвейером. Процесс формования черепицы состоит из нескольких операций.

Первая по ходу конвейера операция – укладка поддонов в гнезда кассет. Вторая операция – укладка формуемой цементно-песчаной массы, сопровождаемая ее равномерным распределением по поверхности поддона и некоторым предварительным уплотнением – производится бункерным устройством (поз. 11) при помощи четырехлопастного шнека (поз. 12), укрепленного на нижнем конце вертикального вала. По выходе из бункера кассеты с предварительно уплотненной цементно-песчаной массой протягиваются под полумундштуком (поз. 17), который формирует профиль лицевой поверхности черепицы и дополнительно уплотняет массу. Третья операция – окончательное уплотнение формуемой черепицы и калибровка профиля лицевой поверхности. Эта операция производится второй гладилкой (поз. 18). По мере протягивания под второй гладилкой кассет с формуемой гладилкой происходит окончательное уплотнение массы и калибровка лицевого профиля.

В четвертой операции – железнении лицевой поверхности черепицы, т.е. нанесение тонкого слоя цемента, создающего непроницаемую для влаги корку на поверхности черепицы – участвуют опрыскивающее устройство (поз. 20), которое увлажняет поверхность черепицы, механическое сито (поз. 19), с помощью которого на увлажненную поверхность черепицы подается цемент, и плавающая гладилка (поз. 21), которая затирает увлажненный цемент в лицевую поверхность черепицы. Пятая операция – калибровка продольных кромок черепицы путем протягивания ее мимо калибровочных ножей (поз. 27), установленных по бокам калибруемой черепицы и укрепленных на станине. Шестую операцию – сьем формованной черепицы – производят в задней части конвейера. Непосредственно после железнения черепицы, по мере дальнейшего движения конвейера, кассеты выходят за пределы ограничительных боковых стенок и поддон с отформованной

на нем черепицей снимается с конвейера. Производительность данной технологии составляет в зависимости от марки станка порядка 600-800 изделий в час.



1 – бесконечная цепь конвейера, 2 – ведущее и ведомое колеса, 3 – натяжное устройство, 4 – электродвигатель, 5 – клиноременная передача, 6 – двухступенчатый редуктор, 7 – эластичная муфта, 8 – вал, 9 – кассета, 10 – поддон, 11 – бункерное устройство, 12 – четырехлопастной шнек, 13 – двигатель шнека, 14 – клиноременная передача шнека, 15 – горизонтальный вал, 16 – шибер, 17 – полумунштук, 18 – вторая гладилка, 19 – механическое сито, 20 – опрыскивающее устройство, 21 – плавающая гладилка, 22 – боек, 23 – пружина бойка, 24 – кулачок бойка, 25 – валик бойка, 26 – пружина плавающей гладилки, 27 – калибрующие ножи, 28 – пружины, 29 – наклонные склизки

Рисунок 1.21 – Конвейерная схема производства цементно-песчаной черепицы по технологии вибропрокатки

На более сложных станках, например, механизированном формовочном станке «Пегсон» (Англия), поддоны подаются на конвейер непрерывным потоком, что позволяет обеспечить их производительность 1200 – 1500 черепиц в час [28]. На технологической линии такого типа цементно-песчаная масса, попадающая на поддон из бункера, первоначально уплотняется и прокатывается профилирующим валиком, имеющим профиль лицевой поверхности. Затем, когда конвейер с поддонами проходит под неподвижной гладилкой, выполненной из

высокопрочной стали, происходит окончательное уплотнение черепицы, придание ей необходимой формы и толщины, а также заглаживание лицевой поверхности черепицы. На этом этапе формования цементно-песчаная масса представляет собой непрерывно идущую плотную ленту, уложенную на поддонах. На следующем этапе специальное резательное приспособление, работа которого синхронизирована с движением конвейера, разрезает ленту на отдельные черепицы в местах стыковки поддонов. Далее поддоны с отформованной на них черепицей проходят под вибрационным ситом. Здесь лицевая поверхность черепицы покрывается песком и цементом, перемешанным с красителем. Профилирующий валик вдавливают нанесенный слой в лицевую поверхность черепицы, как бы офактуривает ее. Вслед за этим два вращающихся диска производят заглаживание продольных кромок черепицы. Далее поддоны с черепицей поступают на канатный транспортер, с которого происходит разгрузка поддонов с изготовленной черепицей.

В целом технология вибропрокатки – производительный и автоматизированный способ производства бетонных изделий, в том числе и цементно-песчаной черепицы. Однако значительным недостатком технологии вибропрокатки является возможность формировать только черепицу с лицевой поверхностью ленточного типа, т.к. отсутствует возможность формировать верхний поперечный ветровой шип, что налагает ограничения на номенклатуру выпускаемой по данной технологии продукции [28].

Как видно из представленных выше описаний, особенностью технологии изготовления цементно-песчаной черепицы является двухстадийность её изготовления (рисунок 1.22). На первом этапе изготавливается объемно-окрашенное бетонное (цементно-песчаное) изделие. Приготовленная цементно-песчаная смесь с добавлением красителей-пигментов либо укладывается в пресс-формы на поддоне и уплотняется методом вибропрессования, либо изделия формируются методом вибропрокатки на специальных конвейерах. Особенностью цементно-песчаных кровельных изделий, изготавливаемых по традиционным технологиям (вибропрессование, прокатка, вибропрокатка), является пористая

шероховатая поверхность, на которой задерживаются пыль, грязь, отходы жизнедеятельности птиц, поселяются лишайники и мхи, в результате требуется периодическая очистка поверхности кровли [55]. В связи с этим вторым этапом для создания гладкой поверхности черепицы на её лицевую поверхность дополнительно наносится финишное покрытие (т.н. «глазурь»), что позволяет устранить шероховатость поверхности и получить плотную структуру поверхностного слоя бетона, после чего изделия помещаются в пропарочную камеру для ускоренного набора прочности, в которой выдерживаются в течение 6-8 часов в среде насыщенного водяного пара при температуре 60-80°C. Цементно-песчаная черепица с покрытием «глазурью» по своим эксплуатационным свойствам практически не уступает керамической черепице, однако данная дополнительная технологическая операция повышает стоимость изделий.



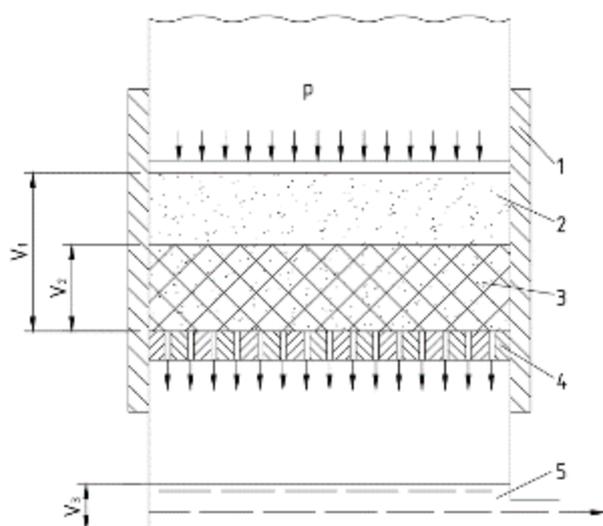
Рисунок 1.22 – Стандартная последовательность изготовления цементно-песчаной черепицы (согласно [30])

#### 1.4 Применение технологии фильтрационного прессования для изготовления плитных облицовочных изделий

В качестве альтернативы традиционным технологиям предлагается способ изготовления цементно-песчаной черепицы по одностадийной технологии фильтрационного прессования, которая заключается в сочетании процесса прессования пластичных смесей с высоким водовязущим отношением и одновременно отводе избытка воды через фильтрующий элемент. Избыток воды затворения, играющий отрицательную роль в процессах структурообразования в

традиционных технологиях, в технологии фильтрационного прессования имеет положительную роль, т.к. обеспечивает удобоукладываемость и максимальное оводнение твердой фазы, уменьшение сил трения частиц твердой фазы смеси между собой и о стенки формы в процессе формования [56]. При этом уже при умеренных давлениях, равных 10-15 МПа [56], достигается плотная упаковка частиц и формирование плотной высокопрочной структуры. Исходя из своих особенностей, технология фильтрационного прессования наиболее эффективна для изготовления облицовочных плитных изделий [57], для которых важнейшими свойствами являются высокая водонепроницаемость и морозостойкость, а также обеспечение гладкой лицевой поверхности, не требующей дополнительной обработки.

Принципиальные основы технологии фильтрационного прессования для изготовления плитных гипсовых изделий были разработаны И.М.Ляшкевичем и представлены в работах [58, 59]. Положительный результат применения технологии фильтрационного прессования для производства плитных изделий на цементной основе представлен в работах К.К.Джакупова и В.В.Бабкова [60, 61]. Принципиальная схема процесса фильтрационного прессования представлена на рисунке 1.23.



*1 – элементы конструкции пресс-формы, 2 – исходная смесь (объем  $V_1$ ), 3 – бетонная смесь после прессования (объем  $V_2$ ), 4 – фильтрующий элемент, 5 – фильтр*

Рисунок 1.23 – Принципиальная схема фильтрационного прессования пластичных бетонных смесей

Технологический процесс производства плитных изделий на цементной основе по технологии фильтрационного прессования включает следующие подготовительные операции [60]: дозирование исходных компонентов смеси (цемента, песка, добавок, красителей, воды затворения); приготовление в смесителе высокоподвижной объемно-окрашенной цементно-песчаной смеси; заливка смеси в пресс-форму и ее прессование с одновременным удалением избыточной воды. Специальные операции по разравниванию и разглаживанию смеси в форме как правило не производятся, формование изделий и придание им гладкой поверхности осуществляется при прессовании. После завершения процесса фильтрационного прессования производят извлечение изделий из пресс-форм за счет выпрессовки или раскрытия боковых металлических стенок пресс-форм, съем изделий и укладку на стеллажи с последующим перемещением в пропарочную камеру для температурно-влажностной обработки. Готовые плиты укладывают в транспортные ящики (контейнеры) с бумажными или картонными прокладками.

Технологический процесс производства плитных гипсовых изделий практически аналогичный [59], отличия заключаются в том, что гипсовый раствор приготавливается путем смешивания гипсового вяжущего, химических добавок, красителей и воды без добавления песка, и готовые изделия не подвергаются термообработке.

Технологическая схема производства плитных изделий по технологии фильтрационного прессования как на гипсовой, так и на цементной основе предполагает использование как стандартного оборудования – бункеров для сырьевых материалов, питателей, дозаторов, смесителей, так и специфического оборудования – гидравлических прессов и пресс-форм [61]. Для фильтрационного прессования используются прессы с усилием от 10 до 1000 тс, преимущественно от 200 до 300 тс. Стандартное давление при фильтрационном прессовании гипсовых композиций составляет от 7 до 15 МПа, продолжительность прессования – от 2 до 4 минут [62].

В качестве фильтрующего слоя, по данным [61] могут быть использованы тканевые, листовые и пластинчатые материалы с размерами пор не менее 1 мкм, а также их сочетания, выдерживающие высокие давления и не пропускающие частицы новообразований цемента (гипса). Принципиальная технологическая схема производства цементно-песчаных плитных изделий по технологии фильтрационного прессования приведена на рисунке 1.24.

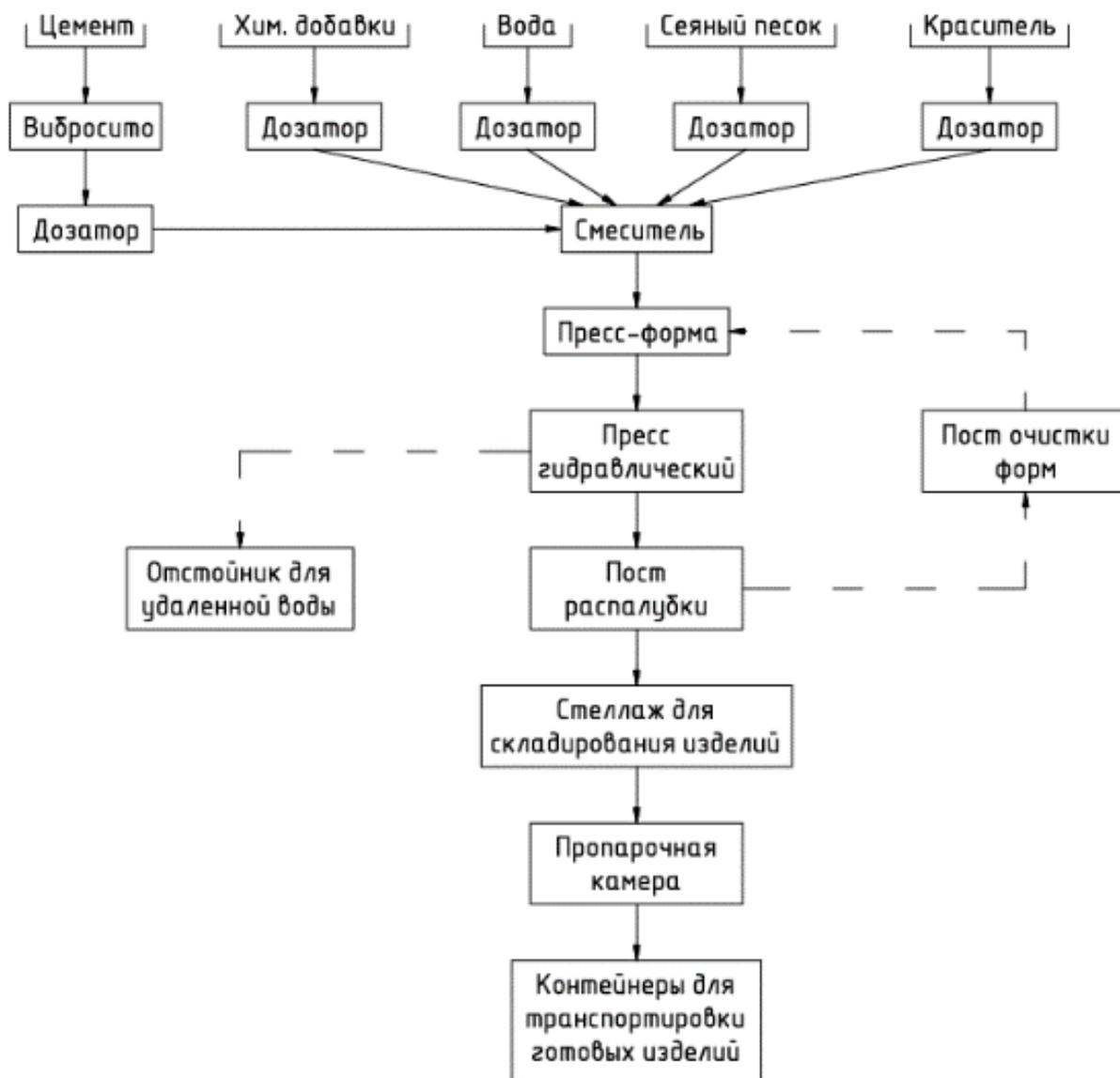


Рисунок 1.24 - Принципиальная технологическая схема изготовления плитных изделий на цементной основе по технологии фильтрационного прессования

При изготовлении плитных гипсовых или цементно-песчаных изделий по технологии фильтрационного прессования пресс-формы обычно размещаются на

конвейере и циклично перемещаются в горизонтальной плоскости [63]. Исходя из траектории перемещения форм, при различают конвейерную, карусельную и конвейерно-карусельную схема прессования, последняя характеризуется поточностью и цикличностью и является наиболее предпочтительной с точки зрения механизации и автоматизации процесса и достижения высокой производительности установки.

Технология фильтрационного прессования плитных гипсовых изделий в 1980-х...1990-х гг. применялась более чем на 10 опытно-промышленных установках в различных регионах Российской Федерации и стран СНГ [64]. Возможность производства по технологии фильтрационного прессования плитных изделий на цементной основе подтверждено исследованиями [60-62], однако практического внедрения пока не получило. Между тем, применение технологии фильтрационного прессования является перспективным направлением при производстве гипсовых и цементно-песчаных изделий, т.к. позволяет по сравнению с традиционной литьевой технологией значительно сократить продолжительность технологического цикла производства изделий и обеспечить после завершения процесса прессования до 60-70% от необходимой прочности, а также получить изделия с высоким качеством лицевой поверхности. Однако, в настоящее время вопрос использования технологии фильтрационного прессования применительно к цементным системам для изготовления кровельных и облицовочных изделий является недостаточно изученным.

### **1.5 Выводы по первой главе**

1. Установлено, что одним из перспективных для широкого применения кровельных изделий является цементно-песчаная черепица, которая обладает большинством достоинств керамической черепицы, но при этом не требует энергоемкого высокотемпературного обжига и за счет этого имеет значительно меньшую стоимость.

2. Рассмотрены традиционные технологии изготовления цементно-песчаной черепицы, определены их достоинства и недостатки. Показано, что значительным недостатком цементно-песчаных кровельных изделий, изготавливаемых по

традиционным технологиям (вибропрессование, прокатка, вибропрокатка), является пористая шероховатая легкозагрязняемая поверхность, которая требует периодической очистки механическим или химическим способом. Для улучшения качества поверхности цементно-песчаной черепицы на нее дополнительно наносится специальное покрытие, что позволяет устранить шероховатость поверхности, получить более плотную структуру поверхностного слоя, повысить водонепроницаемость и морозостойкость изделий, однако это является дополнительной технологической операцией и повышает стоимость черепицы.

3. Предложен альтернативный способ изготовления цементно-песчаной черепицы по одностадийной технологии фильтрационного прессования, которая заключается в сочетании процесса прессования пластичных смесей с высоким водовязущим отношением и одновременном отводе избытка воды через фильтрующий элемент. Показано, что применение технологии фильтрационного прессования является перспективным направлением при производстве гипсовых и цементно-песчаных изделий, т.к. позволяет по сравнению с традиционной литьевой технологией значительно сократить продолжительность технологического цикла производства изделий и обеспечить после завершения процесса прессования до 60-70% от необходимой прочности, а также получить изделия с высоким качеством лицевой поверхности.

4. Установлено, что в Российской Федерации имеется значительный опыт изготовления по технологии фильтрационного прессования плитных гипсовых изделий, при этом вопрос использования технологии фильтрационного прессования применительно к цементным системам для изготовления кровельных и облицовочных изделий является в настоящее время недостаточно изученным.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ

### 2.1 Факторы, обеспечивающие формирование структурно-механических характеристик цементного камня

Как известно, бетон на минеральном вяжущем является капиллярно-пористым телом, на структуру и свойства которого значительное влияние оказывают состав бетонной смеси и технология её уплотнения. Прочность материалов такого типа (капиллярно-пористых материалов) напрямую зависит от их плотности, которая определяется плотностью упаковки структурных элементов (зерен крупного и мелкого заполнителя, тонкомолотого наполнителя), объемом и характером дефектов (пор, микротрещин и др.) [65].

Теоретическими предпосылками формирования прочной и долговечной структуры бетона является наиболее полное использование потенциала портландцемента, создание оптимальной микроструктуры цементного камня, уменьшение макропористости и повышение трещиностойкости, упрочнение контактных зон цементного камня и заполнителя за счет направленного комплекса химических модификаторов и минеральных добавок [66].

Важнейшим фактором, влияющими на пористость бетона, а, следовательно, на плотность бетона, является количество воды затворения, характеризующееся водоцементным отношением В/Ц, и технология уплотнения бетонной смеси. Так, при одинаковой активности и одинаковом расходе цемента можно получить бетон различной прочности в зависимости от изменения количества воды в смеси. Эта зависимость была установлена ещё профессором И.Г.Малюгой в 1895г. [65]

Известно, что для химического взаимодействия цемента с водой в процессе его гидратации требуется всего 18-20% воды от массы цемента (т.е. В/Ц = 0,18-0,2) [67], при этом нормально уплотнить такую смесь практически невозможно. Для получения удобоукладываемой бетонной смеси отношение воды к цементу

обычно принимают равным 0,4-0,6, при этом избыточная вода, не вступая в химическое взаимодействие с цементом, испаряется из бетона, образуя в нем поры, что снижает плотность и прочность бетона. Таким образом, наиболее доступными путями повышения прочности бетона является снижение водоцементного отношения и обеспечения качественного уплотнения бетонной смеси [68, 69].

Согласно классической формуле Скрамтаева [65], ориентировочная прочность бетона при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения для бетонных смесей, уплотняемых вибрацией, при коэффициенте уплотнения не ниже 0,98, составляет:

$R_b = A \cdot R_{ц} \cdot (Ц/В - 0,5)$  – для бетонов с водоцементным отношением, равным или большим 0,4 ( $Ц/В \leq 2,5$ );

$R_b = A_1 \cdot R_{ц} \cdot (Ц/В + 0,5)$  – для бетонов с водоцементным отношением, меньшим 0,4 ( $Ц/В > 2,5$ ),

где  $R_b$  – предел прочности бетона при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения, кг/см<sup>2</sup>;

$R_{ц}$  – активность цемента;

$Ц/В$  – цементноводное отношение в бетоне: отношение веса цемента в единице объема бетонной смеси к весу воды в том же объеме смеси;

$A$  и  $A_1$  – безразмерные коэффициенты, назначаемые в зависимости от качества применяемых заполнителей.

Ориентировочные кривые изменения прочности бетона в зависимости от водоцементного отношения для цемента разных марок (для случая бездобавочного бетона) по данным [65] представлены на рисунке 2.1.

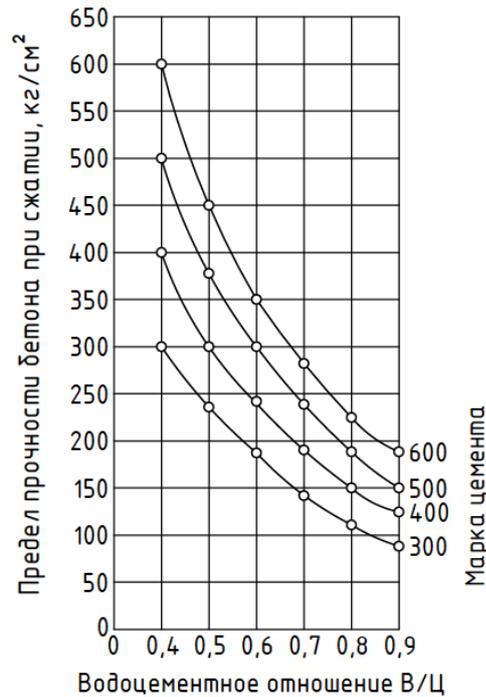


Рисунок 2.1 – Ориентировочная зависимость прочности бездобавочного бетона от водоцементного отношения (по данным [65]).

Современные представления о структуре порового пространства цементного камня были заложены Т.Пауэрсом [70] и позднее усовершенствованы В.С.Данюшевским. Согласно В.В.Данюшевскому [71], «поровое пространство цементного камня характеризуется общей пористостью  $P_0$ , является многограновым и включает в себя четыре основных вида пор, различающихся по размеру:

- гелевые поры с размером от 1 до 10 нм;
- промежуточные поры (поры между кристаллами гидратов) с размером от 10 до 100 нм;
- капиллярные поры (поры между частицами цемента от избытка воды) размером от 100 до 2000 нм;
- воздушные поры (поры от избытка вовлеченного воздуха) размером от 10 до 1000 мкм».

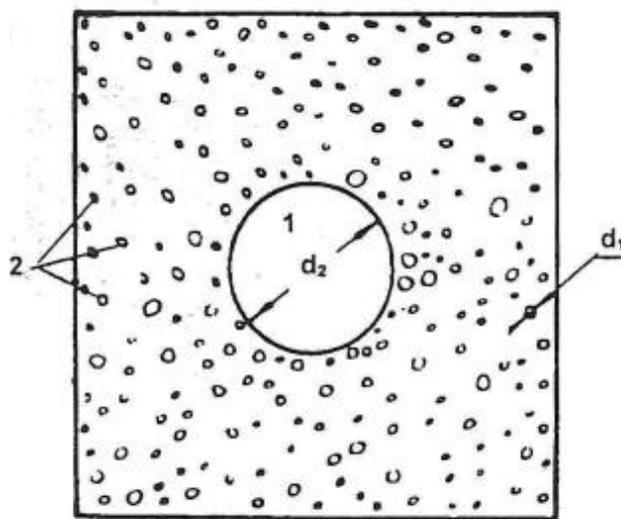
Гелевая пористость возникает в процессе гидратации зерен цемента и связана со значительном увеличением удельной поверхности цементного геля по сравнению с удельной поверхностью негидратированного цемента, т.к.

большинство новообразований цементного камня имеют меньший размер по сравнению с зернами цемента, в связи с чем в теле цементного камня образуются внутренние пустоты между частицами кристаллогидратов, называемые пора́ми геля. В связи с малым размером гелевых пор (которые составляют около 28% от объема цементного камня [72]) образование в них новых частиц твердой фазы невозможно, при этом гелевые поры могут заполняться молекулами воды, поступающими из более крупных пор, которые в порах геля прочно удерживаются поверхностными силами (т.н. физически связанная вода) и не могут быть использованы для дальнейшей гидратации частиц цемента. Общее количество химически и физически связанной воды в цементном геле при полной гидратации цемента может составлять до 48...50% от массы цемента [73]. По своим свойствам к порам геля близки «промежуточные» поры – представляющие собой интервалы между частицами крупнокристаллических продуктов гидратации.

Если образование гелевых и промежуточных пор связано с процессом гидратации зерен цемента, не зависит от водоцементного отношения и в силу малого размера пор гелевая пористость не оказывает влияния на морозостойкость бетона (вода в гелевых порах замерзает при температуре  $-70^{\circ}\text{C}$ ), то более крупные капиллярные поры, которые образуются в результате испарения излишков воды из бетона, и воздушные поры, образующиеся при вовлечении в состав бетонной смеси пузырьков воздуха, при увлажнении бетона заполняются водой, которая замерзает в них при температуре  $^{\circ}\text{C}$ . Объем капиллярной и воздушной пористости в структуре цементного камня значительно влияет на морозостойкость бетона, при повышении плотности цементного камня и уменьшении количества таких пор морозостойкость бетона возрастает [74]. Помимо этого, малый объем микро- и макропор в структуре бетона обуславливает замедление темпов проникновения агрессивных сред и в результате увеличивается долговечность бетонных и железобетонных конструкций [75]. Это позволяет использовать бетоны с повышенной плотностью и прочностью для возведения конструкций, работающих в агрессивных внешних средах и условиях попеременного замораживания-оттаивания: мостовых конструкциях, дорожных сооружениях, при строительстве зданий и сооружений на предприятиях

химической и нефтехимической промышленности, для облицовочных изделий, к которым относится и цементно-песчаная черепица.

Особенности структуры порового пространства цементного камня также определяет механизм его разрушения при сжатии [76]. Сущность отрицательного влияния многогранности порового пространства на прочность бетона определяется следующим. Крупные поры, имеющиеся в структуре материала, при нагружении формируют в своей окрестности значительные по объему поля концентраций напряжений, в зоне влияния которых располагаются мелкие поры, и это при определенном неблагоприятном положении мелких пор может привести к значительному повышению уровня локальных напряжений на микроуровне. По данным ряда исследователей [77, 78], это механизм определяется прежде всего взаимодействием пор двух рангов: капиллярных и воздушных (макропор). Структуру цементного камня можно представить как двухранговую пористую структуру, насыщенную микропорами (капиллярными порами) и включающую одиночные не взаимодействующие между собой макропоры (воздушные поры), находящиеся на значительном расстоянии друг от друга [78]. Работу материала с такой структурой при нагружении определяет макроструктурная ячейка, включающая одиночную макропору и окружающий эту макропору поризованный микропорами цементный камень (рисунок 2.2).



*1 - одиночная макропора, 2 - микропоры*

Рисунок 2.2 – Макроструктурная ячейка цементного камня

Согласно В.В.Бабкову [61], средний размер капиллярной поры  $a_y$ , определяется как среднее расстояние между гидратирующими частицами цемента и может быть представлен как отношение капиллярной пористости к удельной поверхности гидратирующих частиц, скорректированное коэффициентом  $n$ , учитывающим влияние формы пор:

$$a_y = \frac{V_y}{S_y} = \frac{n \cdot [w/c - \theta_x(\vartheta - 1)]}{S_{x0} \gamma_x [1 + \theta_x(\vartheta - 1)]^{2/3}} \quad (2.1)$$

где  $n = 5 \dots 7$ ;

$w$  – водоцементное отношение системы;

$c$  – отношение плотностей воды и вяжущего;

$\theta_x$  – степень гидратации вяжущего;

$\vartheta$  – коэффициент увеличения объема твердой фазы при химическом переходе вяжущего в гидрат (около 2,2 для портландцемента);

$S_{x0}$  – удельная поверхность исходного вяжущего,  $m^2/kg$ ;

$\gamma_x$  – плотность вяжущего,  $kg/m^3$ .

Как видно из формулы 2.1, формирование более однородной структуры пористости и повышение прочности цементного камня при повышении степени гидратации связано не только с понижением общего объема капиллярной пористости, но и со снижением среднего размера капиллярных пор. Исходя из представленной структуры цементного камня, рядом исследователей [78, 79, 80] выявлены закономерности, показывающие, что повышение прочности пористого материала возможно одним из трех путей или их сочетанием:

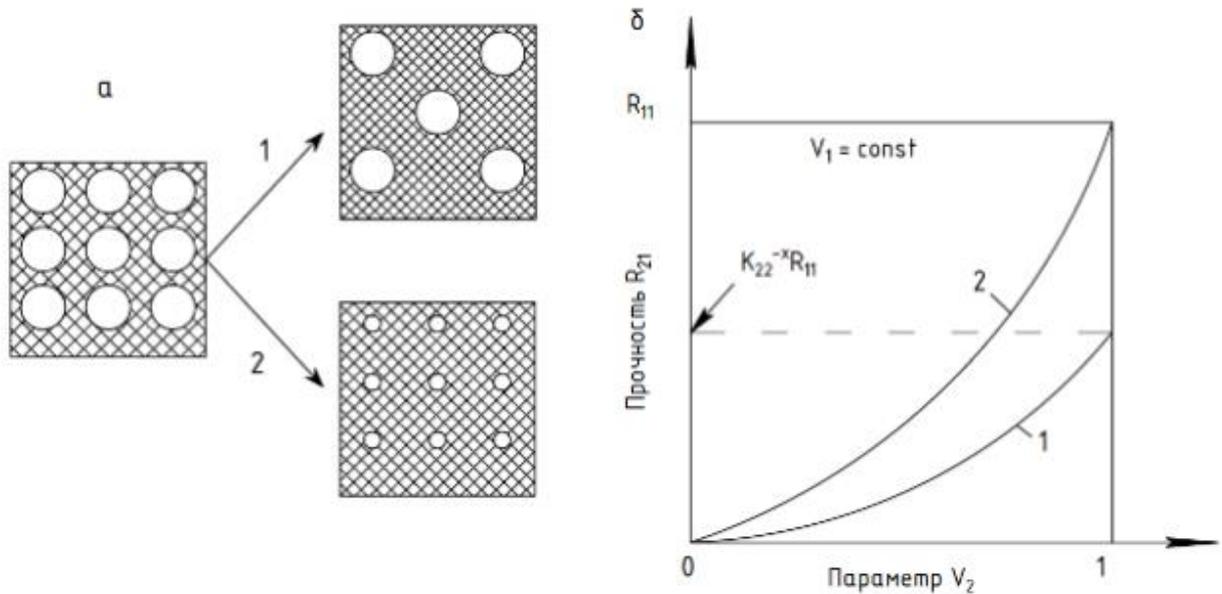
- снижением общей пористости;
- снижением числа рангов пор (выравниванием размеров пор);
- выравниванием локальных относительных плотностей, т.е. равномерным распределением пор в каждой единице объема материала.

В частности, в экспериментах Н.Альфорда [81] в одинаковых условиях твердения при практически одинаковых значениях общей пористости (равной

0,20 – 0,22) за счет уменьшения размеров максимального размера воздушных пор был получен цементный камень, различающийся по прочности в несколько раз. Если для контрольного состава, для которого максимальный размер пор заземленного воздуха составил 1 – 2,5мм, прочность на растяжение при изгибе составила 8 МПа, то при снижении наибольшего размера пор до 300 мкм прочность на изгиб цементного камня увеличилась до 19,5 МПа, а при дальнейшем уменьшении наибольшего размера пор до 90 мкм прочность на изгиб цементного камня достигла 40,5МПа.

Согласно [78], представленные выше результаты экспериментов можно объяснить следующим образом. Повышение прочности цементного камня при уплотнении бетонной смеси происходит в несколько этапов. На начальном этапе пока размер воздушных пор  $d_2$  значительно больше размера капиллярных пор  $d_1$ , уменьшение размера воздушных пор мало влияет на прочность цементного камня, упрочнение которого происходит за счет снижения общей пористости системы. На втором этапе при одновременно со снижением общей пористости происходит и уменьшение размера воздушных пор (макропор) с постепенным сближением размера макропор с размером капиллярных пор, в результате этого происходит постепенное повышение прочности цементного камня под влиянием двух одновременно действующих факторов – уменьшения общей пористости  $P_0$  и размеров воздушных пор  $d_2$ . На третьем этапе, в случае, если удастся полностью исключить макропоры из структуры цементного камня или снизить их размер до размера капиллярных пор, происходит значительное дополнительное упрочнение цементного камня, что и было показано в работе [81].

В работе [78] представлены результаты исследования влияния изменения количества пор и изменения ранга пористости на прочность цементного камня (рисунок 2.3).



*1 – уплотнение путем уменьшения количества пор одного ранга,  
2 – уплотнение путем уменьшения размеров пор при их неизменном количестве*  
Рисунок 2.3 – Две схемы уплотнения пористой структуры и соответствующие им зависимости прочности двухранговой структуры на растяжение (согласно [78]):

Таким образом, эффективным технологическим приемом повышения прочности цементного камня (и бетона в целом) является не только снижение общей пористости  $\Pi_0$  за счет уменьшения расхода воды (снижение капиллярной пористости) и тщательного уплотнения бетонной смеси (снижение воздушной пористости), но и снижения ранга пористости (выравнивания размеров пор) за счет разбивки крупных пор на более мелкие.

## **2.2 Особенности формирования структуры цементного камня бетонов с высокими прочностными и эксплуатационными свойствами**

В последние десятилетия в технологии бетона произошли значительные изменения, связанные с широким внедрением в практику химических добавок (прежде всего суперпластификаторов) и минеральных добавок. Это позволило перейти к массовому производству бетонов нового поколения – т.н. бетонов с высокими эксплуатационными и технологическими свойствами (высококачественные бетоны), которые в мировой литературе принято обозначать

термином High Performance Concrete (HPC) [82]. Особенностью бетонов нового поколения (высококачественных бетонов) является их многокомпонентность, т.к. помимо традиционных составляющих бетона – цемента, крупного и мелкого заполнителя и воды – в их состав входят химические добавки различного назначения (суперпластифицирующие, ускорители или замедлители, противоморозные и т.д.), а также минеральные добавки - наполнители (один или два с разной дисперсностью) [83]. Сложный многокомпонентный состав позволяет получать бетонные смеси и бетоны с заданными свойствами – высокой прочностью, низкой проницаемостью и коррозионной стойкостью и т.д.

Суперпластифицирующие добавки вводят в состав бетонной смеси в небольшом количестве (0,5-2% от массы цемента), они увеличивают подвижность бетонной смеси при неизменном количестве воды затворения либо позволяют снизить расход воды затворения при неизменной подвижности бетонной смеси [84, 85]. Первые суперпластифицирующие добавки на лигносульфонатной основе появились в 1980-х гг. (самая известная марка на отечественном рынке – «Лигнопан»), в 1990-х гг. им на смену пришли суперпластификаторы на нафталинсульфонатной основе (суперпластификатор С-3 и значительное количество его модификаций), а в начале 2010-х годов широкое распространение получили еще более «сильные» суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе [86].

Применение суперпластифицирующих добавок позволяет значительно снизить расход воды затворения и уменьшить объем капиллярных пор и за счет этого получить более высокую плотность и прочность бетона без увеличения расхода цемента либо сократить расход цемента при сохранении прочности бетона. Так, если ранее стандартное В/Ц для получения достаточно подвижной бетонной смеси составляло 0,45-0,55, то сейчас пластичные смеси с маркой по подвижности П5 (ОК 21-25 см) изготавливаются при В/Ц 0,32-0,38, т.е. расход воды затворения снижается на 20% и более. Применение суперпластифицирующих добавок позволило значительно расширить область применения вибролитьевой технологии изготовления бетонных и

железобетонных изделий и конструкций и производить с её применением (при условии применения качественных заполнителей) изделия и конструкций достаточно высокой прочности и морозостойкости, а также способствовало широкому внедрению в практику строительства монолитного бетонирования [87].

Помимо химических добавок, обязательным компонентом высококачественных бетонов являются минеральные добавки (тонкомолотые минеральные наполнители) [88], которые представляют собой минеральные порошки различной природы, получаемые из природного или техногенного сырья (молотый кварцевый песок, каменная мука из карбонатных горных пород, молотые металлургические шлаки, золы-уноса ТЭЦ, микрокремнезем, метакаолин и др.). Большинство тонкомолотых минеральных наполнителей имеют размер зерен, близкий к размеру зерен цемента (удельная поверхность 2000-5000 см<sup>2</sup>/г) [89] и располагаются в структуре цементного камня в промежутках между зернами заполнителя, за исключением микрокремнезема, частицы которого значительно меньше зерен цемента (удельная поверхность 20000-30000 см<sup>2</sup>/г) и могут располагаться в промежутках между зернами цемента, повышая за счет этого плотность, прочность и непроницаемость бетона [90, 91]. Для наглядности данные о размерах частиц различных минеральных наполнителей в сравнении с цементом приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Размеры частиц минеральных наполнителей в сравнении с размерами частиц цемента

Наименование параметра	Микро-кремнезем	цемент	Зола-унос	Молотый доменный шлак	Каменная мука
Размер частиц, мкм	0,1-0,2	5-80	10-100	5-50	40-80
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	160000-250000	2500-5000	1500-3000	2500-5000	2000-3000

Минеральные добавки подразделяются на активные и инертные [92]. Активные минеральные добавки, к которым относятся, в частности, молотые металлургические шлаки, способны к самостоятельному гидравлическому

твердению, которое значительно активизируется при добавке извести ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) [93, 94]. На свойства минеральных добавок значительное влияние оказывает их зерновой состав, который определяет удельную поверхность и, соответственно, реакционную способность минеральных добавок [95, 96].

Инертные минеральные добавки, например, тонкомолотые карбонатные породы (известняк, доломит) или молотый кварцевый песок, при обычной температуре не вступают в реакцию с компонентами цемента. Инертные минеральные добавки используют для регулирования зернового состава и пустотности твердой фазы бетона с целью управления свойствами и структурой бетонной смеси и бетона [92].

Минеральные добавки (минеральные порошки) в настоящее время являются необходимой составляющей асфальтобетонных смесей. Минеральный порошок, зерна которого, как и в цементном бетоне, располагаются в битуме, т.е. в связующем между зернами заполнителя, и адсорбирует на себя значительную часть битума. Добавление минерального порошка повышает прочность на сжатие, стойкость к трещинообразованию, деформативность и износостойкость асфальтобетона, тем самым значительно улучшает качество асфальтобетонного покрытия, продлевает срок его службы и дает значительную экономию при эксплуатации [97].

Минеральные порошки выпускаются по ГОСТ Р 52129-2003 [98] и в зависимости от показателей свойств подразделяются на марки:

- МП-1 – изготавливается дроблением осадочных горных и битумозных пород. Может быть активированным и неактивированным;
- МП-2 – производится помолом некарбонатных горных пород и отходов промышленных производств.

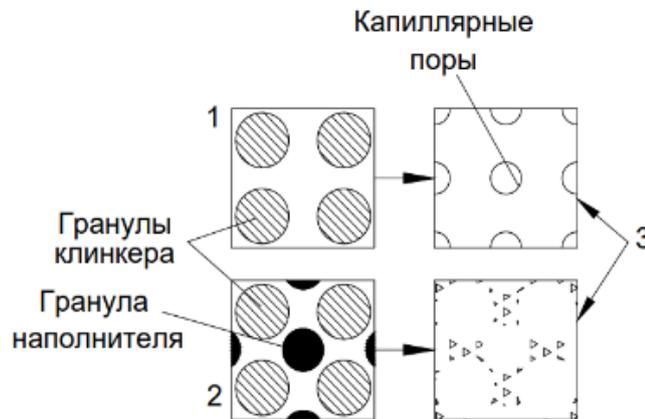
Наиболее широко применяется минеральный порошок МП-1, изготавливаемый путем помола отсевов дробления карбонатных горных пород (т.н. каменная (известняковая или доломитовая) мука), которые имеют меньшую прочность по сравнению с изверженными горными породами и природным кварцевым песком, и, следовательно, требуют меньшие затраты на помол.

В целом, по данным ряда исследователей, введение минеральных добавок в состав бетонной смеси позволяет улучшить пластичность и удобоукладываемость бетонной смеси, повысить водоудерживающую способность и снизить вероятность расслаивания бетонной смеси. В литературе [99, 100] выделяются несколько факторов положительного влияния минеральных добавок на структуру и физико-механические свойства цементных композиций:

- снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя за счет заполнения ими промежутков между зернами мелкого заполнителя и создания более плотной упаковки инертных частиц (рисунок 2.4);

- ускорение начальной стадии химического твердения цементных систем с частицами наполнителя, служащими центрами кристаллизации;

- образование кластеров «вяжущее-наполнитель» за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя.



*1 – структурная ячейка цементного камня, 2 – структурная ячейка цементного камня с минеральным наполнителем, 3 – характер капиллярной пористости для ячеек 1 и 2.*

Рисунок 2.4 – Принципиальная схема структуры цементного камня без минерального наполнителя и с добавкой минерального наполнителя

Таким образом, основным фактором положительного влияния тонкомолотых минеральных наполнителей (ТМН) на структуру и физико-механические свойства цементных композиций являются снижение общей пористости и уменьшение

размеров капиллярных пор в цементном камне за счет заполнения частицами минерального наполнителя промежутков между зернами цемента и создания более плотной упаковки частиц, что указывается в работах [78, 101] и наглядно показано на рисунке 2.4, а также происходит ускорение начальной стадии химического твердения цементных систем с частицами наполнителя, служащими центрами кристаллизации.

Рядом исследователей [78, 102-104] показано, что при введении в состав цементного раствора тонкомолотого минерального наполнителя прочность образцов, твердеющих в одинаковых условиях, может возрасти в 3-4 раза, что можно объяснить различием структур по интегральной и дифференциальной пористости цементного камня (рисунок 2.4). Бездобавочный цементный раствор на стадии затворения имеет значительное количество крупных пустот между гранулами клинкера (ячейка 1 на рисунке 2.5), которые в процессе гидратации не в полном объеме заполняются гидратной связкой, образуя крупноразмерные капиллярные поры, что формирует в такой системе многогранговую структуру цементного камня с большим значением среднего размера капиллярных пор  $r_1$  (рисунок 2.5, б).

При введении в цементный раствор тонкодисперсного (тонкомолотого) минерального наполнителя его частицы заполняют значительную часть объема крупных пустот, за счет этого происходит изменение структурной ячейки (ячейка 2 на рисунке 2.5). Это значительно меняет как интегральную, так и дифференциальную пористость системы, уменьшая общий объем пустот и средний размер пустот на дифференциальной зависимости (ячейка 2 на рисунке 2.5), что в конечном итоге за счет снижения размера крупных капиллярных пор и уменьшения числа рангов пористости позволяет значительно повысить прочность цементного камня [78].

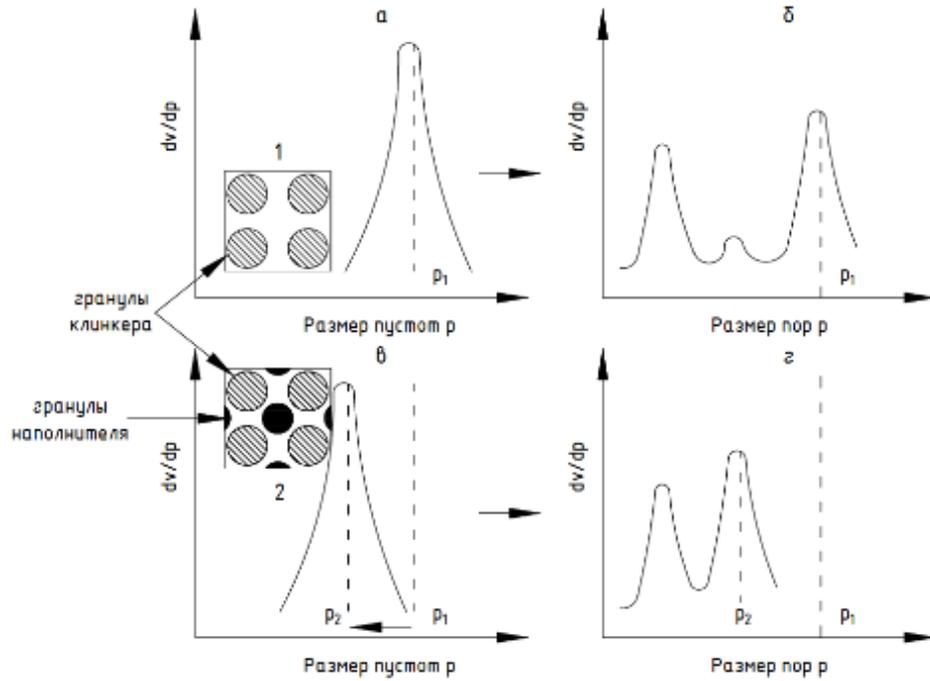


Рисунок 2.5 – Интегральная пористость цементных растворов, соответствующая грубодисперсному клинкеру (а, ячейка 1), клинкеру с добавкой тонкодисперсного наполнителя (в, ячейка 2) и соответствующая им дифференциальная пористость цементного камня (б, г)

Согласно В.В.Бабкову [61], для дисперсной системы, включающей, помимо вяжущего, некоторое количество инертного либо малоактивного минерального наполнителя  $V_f = a_v \cdot V_{x0}$  (где  $V_{x0}$  – объемная концентрация вяжущего в исходном цементном растворе) приблизительно одинаковой с вяжущим плотности  $\gamma_f \approx \gamma_x$ , при дисперсности наполнителя по удельной поверхности  $S_f = \beta \cdot S_{x0}$  и его гидравлической активности  $\theta_f = \xi \cdot \theta_x$ , средний размер капиллярной поры определяется как

$$a_{yf} = \frac{V_{yf}}{S_{yf}} = \frac{n \cdot [w/c - (\theta_x(\vartheta - 1) + \alpha_v + \alpha_v \theta_x \xi (\vartheta - 1))]}{S_{x0} \gamma_x \{ [1 + \theta_x(\vartheta - 1)]^{2/3} + \beta \cdot \alpha_v [1 + \xi \theta_x (\vartheta - 1)]^{2/3} \}} \quad (2.2)$$

где  $V_{yf}$  – объем капиллярной пористости бинарной системы, содержащей вяжущее и минеральный наполнитель;

$S_{yf}$  – удельная поверхность гидратируемых частиц;

$n = 5 \dots 7$  – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние формы пор;

$w'$  – водотвердое отношение системы;

$c$  – отношение плотностей воды и вяжущего;

$\theta_x$  – степень гидратации вяжущего;

$\vartheta$  – коэффициент увеличения объема твердой фазы при химическом переходе вяжущего в гидрат (около 2,2 для портландцемента);

$S_{x0}$  – удельная поверхность исходного вяжущего,  $m^2/kg$ ;

$\gamma_x$  – плотность вяжущего,  $kg/m^3$ ,

$\beta$  – коэффициент, учитывающий отношение дисперсности наполнителя к дисперсности вяжущего (т.е. отношение удельной поверхности наполнителя  $S_f$  к удельной поверхности вяжущего  $S_{x0}$ );

$\alpha_v$  – концентрация наполнителя;

$\xi$  – отношение гидравлической активности  $\theta_f$  – малоактивного наполнителя к гидравлической активности вяжущего  $\theta_x$ .

Анализируя формулы 2.1 и 2.2 можно видеть, что средний размер капиллярной поры  $a_{yf}$  в цементном камне на вяжущем с добавлением тонкомолотого минерального наполнителя с повышением дисперсности и концентрации наполнителя (увеличением  $\beta$  и  $\alpha_v$ ) будет существенно снижаться по сравнению с цементным камнем на немодифицированном (чисто цементном) вяжущем.

Результаты многочисленных исследований [105] показывают, что наилучшие результаты показывает совместное применение органического и минерального компонентов, т.к. тонкодисперсные минеральные добавки повышают эффективность действия пластификаторов и наоборот, пластификаторы способствуют положительному действию минеральных наполнителей на структуру бетонной смеси и бетона. В частности, разработанные совместно «Научно-исследовательским институтом бетона и железобетона» (НИИЖБ) совместно и ООО «Мастер-Бетон» органо-минеральные модификаторы серии «МБ» [99, 100] представляют собой смесь суперпластификатора С-3, регулятора твердения и минеральной добавки (микрокремнезема, золы уноса или их

сочетания). Исследованиями [99, 102, 105] показано, что введение в состав тяжелого бетона органо-минерального модификатора «МБ» позволяет повысить прочность бетона на сжатие в 2 – 2,5 раза, а также значительно повысить его непроницаемость и коррозионную стойкость. С применением модификаторов «МБ» были разработаны составы монолитного тяжелого бетона классов по прочности на сжатие В40-В90, марок по водонепроницаемости W12-W16, марок по морозостойкости до F<sub>200</sub>, которые были применены при возведении высотных зданий ММДЦ «Москва-Сити», а также ряда объектов метрополитена в г. Москва, мостового, дорожного и гидротехнического строительства [90].

Как следует из вышеизложенного, введение в состав бетонной смеси тонкомолотого минерального наполнителя, частицы которого заполняют структурные ячейки между зернами портландцементного клинкера и перекрывают крупные капиллярные поры, изменяя при этом как интегральную, так и дифференциальную пористость цементного камня в направлении уменьшения размеров капиллярных пор, является эффективным приемом регулирования пористости цементного камня и позволяет повысить прочность и непроницаемость бетона, при этом повышенная водопотребность растворов и бетонов с добавкой ТМН эффективно корректируется введением суперпластификаторов.

### **2.3 Особенности применения технологии фильтрационного прессования для изготовления тонкостенных изделий на цементно-песчаной основе**

Положительный эффект от совместного введения в бетонную смесь суперпластифицирующих добавок и наполнителей может быть успешно реализован при производстве бетонных изделий по технологии фильтрационного прессования, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.23.

Технология фильтрационного прессования позволяет соединить преимущества, присущие вибролитьевой технологии и технологии полусухого прессования бетонных изделий, при это минимизировать их недостатки [64]. Наличие достаточного количества воды затворения позволяет обеспечить

необходимое оводнение зерен вяжущего, требуемое для начала интенсивного процесса гидратации, а также обеспечивает хорошую удобоукладываемость смеси. Это позволяет устранить недостатки, присущие способу полусухого прессования, связанными с трудностью перемешивания бетонной смеси и неравномерным её распределением в процессе вибрационного прессования. Далее в процессе фильтрационного прессования избыточная вода удаляется отжатием при давлении 10-15 МПа, при этом происходит значительное уплотнение бетонной смеси с удалением излишков воздуха и снижения до минимальных значений объема капиллярных и воздушных пор. Более того, давление прессования влияет не только на уплотнение бетонной смеси, но и на кинетику гидратации и структурообразования бетона [60].

Применение технологии фильтрационного прессования для производства облицовочных плитных изделий на основе гипсового вяжущего подробно описана в работах [56] и [59]. Давление прессования в них рассматривалось в качестве фактора, определяющего не только уплотнение гипсовой смеси и форму изделия, но и кинетику фазовых и химических превращений в системе, а также обуславливающего протекание процессов гидратации, структурообразования и упрочнения материала во времени.

Как указывается в [56], материалы на основе гипсового вяжущего, изготовленные по традиционным технологиям, характеризуются низкими физико-механическими показателями, обусловленными макропористой структурой с высокой интегральной пористостью системы (с преобладанием пор диаметром более 1 мкм), с плохо развитыми фазовыми контактами. Причина формирования такой структуры – значительный дополнительный расход воды затворения для обеспечения удобоукладываемости вяжущего (сверх того, который достаточен для гидратации вяжущего). При фильтрационном прессовании в процессе отжима воды происходит сближение частиц твердой фазы до возникновения ближней коагуляции, в результате чего происходит интенсификация процесса образования кристаллизационных контактов между частицами гипса и формирование плотной прочной структуры гипсового камня. Исследованиями [59] показано, что

прочность образцов гипсового вяжущего ( $\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), изготовленных по технологии фильтрационного прессования, по сравнению с контрольным образцами того же состава, изготовленными по традиционной технологии, в возрасте 1 суток возрастает с 7,5 МПа до 50 МПа, а в возрасте 7 суток – с 11,5 МПа до 69 МПа.

В работе [60] представлены результаты испытаний опытных образцов мелкозернистых бетонов на основе цемента и кварцевого песка, изготовленных по технологии фильтрационного прессования. Для придания декоративной выразительности в сырьевую смесь дополнительно вводили минеральные пигменты, а для интенсификации процесса твердения – модифицирующие добавки. Прессование смеси осуществлялось под давлением от 5 до 10 МПа с удалением избыточной влаги. Отформованные образцы имели остаточное водоцементное отношение, равное 0,2...0,25, плотность 2200-2250 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие в возрасте 28 суток нормального твердения от 32 до 48 МПа, морозостойкость – от 100 до 350 циклов попеременного замораживания – оттаивания. В работе [61] отмечено, что при сжатии бетонных смесей происходит сближение гидратирующих частиц цемента, в результате чего процесс их гидратации и формирования контактов между ними протекает более активно, что позволяет получить более плотную структуру бетона.

В работе [106] представлено описание принципиальная схема формирования микроструктуры цементного камня при введении в состав бетонной смеси ультрамикродисперсного наполнителя (микрокремнезема), размер частиц которого значительно меньше размера частиц цемента. Показано, что движение воды в цементной системе без микронаполнителя возможно только через капиллярные поры, которые остаются свободными от адсорбционных пленок и располагаются между зернами цемента. Обеспечение долговечности цементного камня может быть достигнуто введением ультрадисперсного микронаполнителя, занимающего объем между зернами цемента и позволяющего при высокой степени уплотнения структуры в условиях фильтр-прессования цементно-песчаных композиций получить практически водонепроницаемый бетон.

Следует отметить, что в рассмотренных ранее работах при изготовлении бетонных изделий по технологии фильтрационного прессования в состав бетонной смеси вводилась либо суперпластифицирующая добавка [63], повышающая подвижность и снижающая водопотребность смеси, либо минеральный наполнитель [60, 61], выполняющие функцию заполнителя на уровне микроструктуры цементного камня. Между тем, исходя из опыта получения высокопрочных бетонов рядом автором [100, 107] показывается, что рациональным является совмещение двух видов добавок – суперпластифицирующих и минеральных. Это объясняется тем, что инертные минеральные наполнители не обладают гидравлической активностью и, следовательно, практически не связывают воду, в то время как минералы цементного клинкера с первых минут затворения активно взаимодействуют с водой и образуют гидросиликаты, снижая тем самым эффективность действия суперпластификаторов [108].

Как показано в работе [60], большое влияние на свойства получаемых материалов и сам процесс фильтрационного прессования оказывает дисперсность исходных продуктов и их фракционный состав. При сжатии бетонной смеси постоянной нагрузкой процесс деформирования может быть разделен на две стадии. На первой стадии происходит сравнительно быстрое истечение свободной воды через открытые пустоты: в этот период поровое пространство бетонной смеси является открытой гидравлической системой. После закупорки пустот связанной водой поровое пространство цементно-песчаных композиций становится закрытой гидравлической системой с затрудненным истечением воды. Фактически это выражается в постепенном выталкивании молекул воды из адсорбционной пленки в свободное пространство цементно-песчаных композиций. Выбор оптимального режима технологического процесса фильтрационного прессования в значительной степени определяется параметрами структуры наполнителя: размером частиц, структурной прочностью и пористостью частиц [60]. Величина давления и временной интервал фильтрационного прессования определяются также технологическими возможностями используемого оборудования.

Схематически представляя соприкасающиеся частицы структуры цементного камня в виде сфер одинаковых размеров (рисунок 2.6), можно определить, что продвижение воды в структуре цементного камня возможно только по тому промежутку, который остается свободным от адсорбционных пленок, и имеет форму равностороннего криволинейного треугольника [109]. Размер указанного промежутка  $h$ , определяется геометрически по формуле [110]:

$$h = 2(R + z) \cos \frac{\pi}{6} - (R + a) - \sqrt{(R + a)^2 - (R + z)^2} \quad (2.3)$$

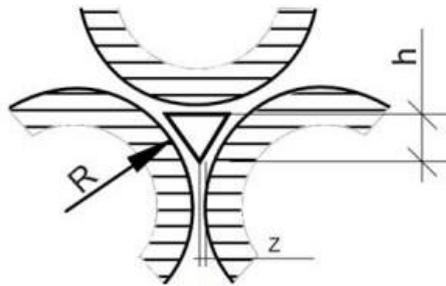


Рисунок 2.6 – Схематичное изображение участка примыкания трех частиц цемента друг к другу

Для воды полная невозможность продвигаться через данное сечение выражается условием  $h = 0$ , что может достигнуто размещением в промежутке между частицами цемента зерен тонкомолотого минерального наполнителя.

В целом, введение в цементные системы тонкодисперсных минеральных наполнителей позволяет получать высокоподвижные бетонные смеси и обеспечить формирование плотной структуры цементного камня. В условиях фильтрационного прессования некоторое увеличение водопотребности смесей с использованием тонкодисперсных наполнителей не играет отрицательной роли, так как избыток воды затворения удаляется через фильтрующее оборудование. Наиболее высокая плотность структуры может быть достигнута за счет введения в систему 2-3 фракций минеральных наполнителей [111]. Совместное введение суперпластификаторов и минеральных добавок-наполнителей в цементные композиции при производстве изделий по фильтрпрессовой технологии позволяет значительно улучшить формуемость смеси и её удобоукладываемость в условиях прессования, получить более плотную структуру мелкозернистого бетона и повысить его долговечность.

## 2.4 Выводы по второй главе

1. Поровое пространство цементного камня, характеризующееся общей пористостью  $P_0$ , является многограновым и включает поры нескольких характерных размеров: гелевые поры, промежуточные поры (поры между кристаллами гидратов), капиллярные поры, воздушные поры. Многограновость пористой структуры цементного камня, обуславливающая взаимодействие пор смежных рангов в силу наложения полей напряжений, приводит к значительным дополнительным потерям прочности бетоном.

2. Повышение прочности пористой структуры цементного камня возможно одним из трех путей или их сочетанием: снижением общей пористости  $P_0$  за счет уменьшения капиллярной пористости (путем понижения водоцементного отношения) и воздушной пористости, снижением числа рангов пор (выравниванием размеров пор) за счет разбивки крупных пор на более мелкие и равномерным распределением пор в каждой единице объема материала.

3. Основным фактором положительного влияния тонкомолотых минеральных наполнителей (ТМН) на структуру и физико-механические свойства цементных композиций являются снижение общей пористости и уменьшение размеров капиллярных пор в цементном камне за счет заполнения частицами минерального наполнителя промежутков между зернами цемента и создания более плотной упаковки частиц, а также частицы ТМН являются центрами кристаллизации и способствуют ускорению начальной стадии гидратации цементных систем.

4. Положительный эффект от совместного введения в бетонную смесь суперпластифицирующих добавок и ТМН может быть успешно реализован при производстве бетонных изделий по технологии фильтрационного прессования. Наличие достаточного количества воды затворения позволяет обеспечить необходимое оводнение зерен вяжущего, требуемое для начала интенсивного процесса гидратации, далее в процессе фильтрационного прессования избыточная вода удаляется через фильтрующее оборудование, при этом происходит значительное уплотнение бетонной смеси с понижением остаточного водотвердого отношения до 0,18 – 0,20, удалением излишков воздуха и снижением до минимальных значений объема воздушных и капиллярных пор.

### **3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ**

#### **3.1 Исходные сырьевые материалы для проведения исследований**

С целью оценки возможности изготовления цементно-песчаной черепицы по методу фильтрационного прессования с использованием местных сырьевых материалов Республики Башкортостан был проведен комплекс лабораторных исследований по подбору состава цементно-песчаной смеси и испытанию изготовленных методом фильтрационного прессования образцов в лабораторных условиях.

В качестве исходных материалов для подбора состава цементно-песчаной смеси были выбраны следующие:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н ГОСТ 31108-2020 [112] (производства Филиал ООО «Хайдельберг ЦементРус», г. Стерлитамак, Республика Башкортостан);
- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108-2020 [112] (производства ООО «Катавский цемент», г. Катав-Ивановск, Челябинская область);
- песок с максимальной крупностью зерен 1,25мм, отсеянный из песчано-гравийной смеси;
- минеральный наполнитель: минеральный порошок МП-1 (неактивированный) по ГОСТ Р 52129-2003 [98];
- суперпластифицирующая добавка на нафталинсульфонатной основе ПФМ-НЛК, выпускаемая ООО «Полипласт» (Россия);
- суперпластифицирующая добавка на основе поликарбоксилатов «СТС-01» (производство г. Екатеринбург);
- базальтовая фибра;
- краситель (пигмент) для объемного окрашивания бетона;
- вода техническая по ГОСТ 23732-79 [113].

Выбор бездобавочного портландцемента ЦЕМ I 52,5 Н (ЦЕМ I 42,5 Н) в качестве вяжущего обусловлен тем, что при изготовлении цементно-песчаных изделий по технологии фильтрационного прессования рациональным является применение цементов с высокой активностью и высокой удельной поверхностью, обладающих ускоренным процессом гидратации и обеспечивающих ускоренный набор прочности в ранние сроки.

Портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н производства Филиал ООО «Хайдельберг ЦементРус» (г. Стерлитамак) согласно предоставленному документу о качестве имел следующие характеристики:

- прочность на сжатие в возрасте 2 суток – 32,7 МПа;
- прочность на сжатие в возрасте 28 суток – 62,2 МПа;
- нормальная плотность цементного теста – 28%;
- начало схватывания – 210 минут;
- конец схватывания – 320 минут.

Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ООО «Катавский цемент», (г. Катав-Ивановск) согласно предоставленному документу о качестве имел следующие характеристики:

- прочность на сжатие в возрасте 2 суток – 27,0 МПа;
- прочность на сжатие в возрасте 28 суток – 54,0 МПа;
- нормальная плотность цементного теста – 27,5%;
- начало схватывания – 150 минут;
- конец схватывания – 280 минут.

Испытание проб цемента по отдельным показателям было выполнено в соответствии с ГОСТ 30744-2001 [114]. Результаты испытаний представлены в таблицах 3.1 и 3.2. Удельная поверхность портландцемента ЦЕМ I 52,5 Н, определенная с использованием прибора ПСХ, составила около 400 м<sup>2</sup>/кг (4000 см<sup>2</sup>/г), удельная поверхность портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н составила 380 м<sup>2</sup>/кг (3800 см<sup>2</sup>/г).

Таблица 3.1 – Характеристики пробы портландцемента ЦЕМ I 52,5 Н производства Филиал ООО «ХайдельбергЦемент Рус» в г. Стерлитамак

Нормальная густота, %	Остаток на сите №008, % по массе	Сроки схватывания, часов-мин		Предел прочности при изгибе, МПа, после 28 суток н.т.		Предел прочности при сжатии, МПа, после 28 суток н.т.	
		начало	конец	показатели единичных измерений	среднее значение	показатели единичных измерений	среднее значе- ние
29	1,0	3-40	5-30	5,72 5,61 5,68	5,67	58,7 61,1 59,0	59,6

Таблица 3.2 – Характеристики пробы портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н производства ООО «Катавский цемент»

Нормаль- ная густота, %	Остаток на сите №008, % по массе	Сроки схватывания, часов-мин		Предел прочности при изгибе, МПа, после 28 суток н.т.		Предел прочности при сжатии, МПа, после 28 суток н.т.	
		начало	конец	показатели единичных измерений	среднее значение	показатели единичных измерений	среднее значе- ние
28	1,0	2-30	4-30	5,33 5,21 5,40	5,31	54,0 53,6 55,3	54,3

Как следует из результатов испытаний, обе пробы портландцемента соответствует требованиям ГОСТ 31108-2020 [112] и предоставленным документам о качестве.

Портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н производства ООО «ХайдельбергЦемент Рус» характеризуется несколько более высокими прочностными показателями, при этом портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ООО «Катавский цемент», незначительно уступая по прочности, имеет меньшие сроки начала и конца схватывания, что является положительным моментом для технологии фильтрационного прессования. Однако, для обеспечения более быстрых сроков схватывания цемента рациональнее использовать добавки-ускорители

схватывания, поэтому для дальнейших экспериментов был использован портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н производства филиала ООО «ХайдельбергЦемент Рус» в г. Стерлитамак, имеющий более высокую активность.

Испытание песка, отсеянного из песчано-гравийной смеси, производилось по методикам ГОСТ 8735-88 [115] на соответствие требованиям ГОСТ 8736-2014 [116] по всем необходимым показателям качества.

Для получения более достоверного результата всего было испытано три пробы песка, результаты испытаний песка представлены в таблицах 3.3-3.5, средние значения приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.3 – Зерновой состав песка, отсеянного через сито 1,25 из природной песчано-гравийной смеси с карьера «Кабаково» (проба 1).

Наименование остатков	Содержание остатков, % по массе, на ситах с размером отверстий, мм				Прошло сквозь сито №0,16, % по массе	Модуль крупности	Содержание зерен крупностью менее 0,16 мм, % по массе	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Содержание илистых и глинистых частиц, %
	1,25	0,63	0,315	0,16					
Частные	0	16,5	49,6	29,9	4,0	-	не более 5 (для I класса)	1427	1,0
Полные	0	16,5	66,1	96,0					

Таблица 3.4 – Зерновой состав песка, отсеянного через сито 1,25 из природной песчано-гравийной смеси с карьера «Кабаково» (проба 2).

Наименование остатков	Содержание остатков, % по массе, на ситах с размером отверстий, мм				Прошло сквозь сито №0,16, % по массе	Модуль крупности	Содержание зерен крупностью менее 0,16 мм, % по массе	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Содержание илистых и глинистых частиц, %
	1,25	0,63	0,315	0,16					
Частные	0	14,2	51,4	30,9	3,5		не более 5 (для I класса)	1432	1,2
Полные	0	14,2	65,6	96,5					

Таблица 3.5 – Зерновой состав песка, отсеянного через сито 1,25 из природной песчано-гравийной смеси с карьера «Кабаково» (проба 3).

Наименование остатков	Содержание остатков, % по массе, на ситах с размером отверстий, мм				Прошло сквозь сито №0,16, % по массе	Модуль крупности	Содержание зерен крупностью менее 0,16 мм, % по массе	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Содержание илистых и глинистых частиц, %
	1,25	0,63	0,315	0,16					
Частные	0	12,5	51,4	32,8	3,3		не более 5 (для I класса)	1422	0,9
Полные	0	12,5	63,9	96,7					

Таблица 3.6 – Зерновой состав песка, отсеянного через сито 1,25 из природной песчано-гравийной смеси с карьера «Кабаково». Средние значения по результатам параллельных испытаний трех проб.

Наименование остатков	Содержание остатков, % по массе, на ситах с размером отверстий, мм				Прошло сквозь сито №0,16, % по массе	Модуль крупности	Содержание зерен крупностью менее 0,16 мм, % по массе	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Содержание илистых и глинистых частиц, %
	1,25	0,63	0,315	0,16					
Частные	0	14,4	50,8	31,2	3,6	1,76	не более 5 (для I класса)	1427	1,0
Полные	0	14,4	65,2	96,4					

Как видно из таблицы 3.6, песок с максимальной крупностью зерен 1,25мм, отсеянный из песчано-гравийной смеси, характеризуется модулем крупности 1,76 и относится (по классификации ГОСТ 8736-2014 [116]) к группе мелких песков. Зерновой состав является непрерывным, т.е. представлен всеми фракциями. Содержание илистых и глинистых частиц составляет 1,0%, форма частиц песка в основном окатанная, сферическая. По всем испытанным показателям песок, отсеянный через сито 1,25 из природной песчано-гравийной смеси с карьера «Кабаково», соответствует требованиям ГОСТ 8736-2014 [116].

Пробы минерального порошка МП-1 (неактивированного) по ГОСТ Р 52129-2003 [98] производства ООО «Миньярский карьер», согласно паспорту, характеризуется следующими показателями:

- содержание зерен мельче 1,25мм – 100%;
- содержание зерен мельче 0,315мм – 99,8%;

- содержание зерен мельче 0,071мм – 78,1%;
- истинная плотность – 2,72 г/см<sup>3</sup>;
- влажность по массе – 0,3%.

Определение зернового состава пробы минерального порошка МП-1 производилась в соответствии с требованиями п.7.2 ГОСТ 52129-2003 [98] путем просеивания через стандартный набор сит. В результате испытаний было установлено, что содержание зерен мельче 0,071мм составляет 77,5%, что близко к паспортным данным и соответствует требованиям ГОСТ 52129-2003 (от 70 до 80%). Удельная поверхность минерального порошка составляет 350-400 м<sup>2</sup>/кг, что близко к удельной поверхности цемента. Минеральный порошок, изготавливаемый из карбонатных горных пород, широко применяется в качестве тонкомолотого минерального наполнителя при изготовлении асфальтобетонных и бетонных смесей, имеется в достаточном количестве на рынке Республики Башкортостан, а также относительно низкую стоимость (примерно в 3 раза дешевле портландцемента ЦЕМ I 52,5 Н).

Химическая добавка (вариант 1) – ПФМ НЛК, выпускаемая ООО «Полипласт» по ТУ 5745-022-58042865-2007. ПФМ-НЛК – это полифункциональная воздухововлекающая добавка-суперпластификатор с добавлением воздухововлекающего и гидрофобизирующего компонента [117], предназначенная для использования в тяжелых бетонах с целью получения бетона высокой морозостойкости из подвижных или литых смесей.

Рекомендуемый диапазон дозировки добавки ПФМ-НЛК (по данным [117]) составляет 0,4 - 0,8% от массы вяжущего в пересчете на сухое вещество.

Химическая добавка (вариант 2) – суперпластифицирующая и водоредуцирующая добавка на основе поликарбоксилатного полимера с эффектом ускорения твердения «СТС-01» (производство г. Екатеринбург), поставляется в сухом виде и представляет собой порошок белого цвета [118].

Рекомендуемый диапазон дозировок добавки СТС-01 в бетоны и растворы составляет 0,2-0,5% от массы вяжущего в пересчете на сухое вещество.

Для создания дисперсного армирования бетонных и железобетонных конструкций применяются три вида фибры: стальная, полипропиленовая и базальтовая, каждая из которых имеет свое назначение, преимущества и недостатки, а также рациональную область применения [119].

Стальная фибра предназначена для повышения трещиностойкости тяжелых бетонов при воздействии статических и динамических нагрузок, может служить для частичной или полной замены стержневой арматуры или сетки. В зависимости от исходного сырья и способа производства стальная фибра может быть обычной прочности (низкомодульной) с сопротивлением разрыву от 350 до 800 МПа и высокопрочной (высокомодульной) с сопротивлением разрыву от 1000 до 2500 МПа [120]. В зависимости от типа стальной фибры (волновая, плоская фрезерованная и анкерная) ее диаметр составляет от 0,5 до 1,6 мм, длина – от 20 до 70мм. Учитывая, что толщина цементно-песчаных кровельных изделий не превышает 10-12 мм, использование для ее дисперсного армирования стальной фибры не представляется возможным.

Полипропиленовая и базальтовая фибры предназначены для снижения образования усадочных трещин при твердении бетона, повышения прочности бетона на растяжение, повышения истираемости и долговечности бетона [103]. Диаметр волокна как базальтовой, так и полипропиленовой фибры составляет от 10 до 25 мкм, длина волокон – от 5 до 20 мм. Волокна базальтовой фибры имеют примерно в 4-6 раз более высокую прочность на растяжение чем волокна полипропиленовой фибры, а также в 3-5 раз меньшее удлинение при разрыве [121]. Модуль упругости базальтовой фибры составляет около 80 ГПа, в то время как для полипропиленовой фибры не превышает 35-40 Гпа. Также значительным преимуществом базальтовой фибры является еще щелоче- и кислотостойкость [121]. Расход как полипропиленовой, так и базальтовой фибры составляет 0,5-2 кг/м<sup>3</sup> бетона (раствора). С учетом вышеизложенного, на основе сравнения вариантов для проведения исследований была принята базальтовая фибра марки «Сетmix» (рисунок 3.1) с диаметром волокон 20 мкм и длиной волокон 20мм.



Рисунок 3.1 – Описание базальтовой фибры марки «Сетmix»

Пигменты для объемного окрашивания бетона должны обладать очень высокой долговечностью, т.к. кровельная черепица не предполагает ремонта поверхности на протяжении всего срока службы её эксплуатации. Пигменты могут поставляться в виде сухого порошка, эмульсии или пасты-концентрата. Основными разновидностями пигментов в зависимости от происхождения являются [122]:

- органические – искусственная киноварь (ярко-красный), голубой, синий, желтый, бордовый, зеленый, фиолетовый;
- минеральные (неорганические) природного происхождения (получают посредством механической переработки различных материалов) – сурик железный, каолин, охра, умбра, перекись марганца, известь, графит, мел;
- минеральные (неорганические) искусственные – лазурь малярная, свинцовые, цинковые, титановые белила, оксид хрома, цинковая зелень и крон, умбра жженая - изготавливают из минерального сырья, прошедшего термообработку;
- металлические – пыль цинковая, золотистая бронза, пудра алюминиевая.

Химический состав красящих веществ определяет их характеристики, такие как термостойкость, коррозионную стойкость, химическую стойкость.

Количество пигмента, вводимое в бетонную смесь, определяется экономической целесообразностью работы и желаемым цветом [123]. В работе был использован широко представленный на рынке Российской Федерации минеральный пигмент-краситель для бетона красного цвета марки «Основит». Согласно рекомендациям производителя, для получения слабоокрашенного бетона рекомендуемая дозировка пигмента составляет 1-2% от массы цемента, для получения среднеокрашенного бетона – 2-4% от массы цемента, сильноокрашенного бетона – 4-6% от массы цемента.

### **3.2 Методики проведения экспериментальных исследований и разработка составов цементно-песчаной смеси**

С целью разработки состава цементно-песчаной смеси для изготовления изделий по технологии фильтрационного прессования были изготовлены несколько серий образцов различных составов, перечень которых представлен в таблице 3.7. При подборе состава переменными величинами, определяющими физико-механические свойства и качество поверхности фильтпрессованных бетонных изделий, принимались:

- наличие в составе бетонной смеси суперпластифицирующей добавки;
- наличие в составе бетонной смеси тонкомолотого минерального наполнителя – минерального порошка МП-1 (неактивированного);
- подвижность бетонной смеси, определяемая по расплыву конуса.

Для оценки эффективности применения технологии фильтрационного прессования в сравнении с традиционной литьевой технологией из той же цементно-песчаной смеси изготавливались образцы, формируемые по литьевой технологии с уплотнением на вибростоле.

Таблица 3.7 – Составы цементно-песчаной смеси.

№ состава	Наименование состава	Содержание компонентов в составе	Подвижность смеси по расплыву конуса, мм	Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>
1	Контрольный	Цемент (Ц) – 30% Песок – 70% В/Ц=0,72 (В/Т=0,72)	R <sub>к</sub> = 200мм	2064
2	С минеральным порошком (МП)	Цемент – 30% МП – 20%, Песок – 50% В/Ц=0,8 (В/Т=0,48)	R <sub>к</sub> = 210мм	2062
3	С суперпластификатором ПФМ-НЛК	Цемент – 30% Песок – 70% ПФМ-НЛК – 0,4% В/Ц=0,65 (В/Т=0,6)	R <sub>к</sub> = 205мм	2096
4	С МП и суперпластификатором ПФМ-НЛК	Цемент – 30% МП – 20%, Песок – 50% ПФМ-НЛК – 0,4% В/Ц=0,75 (В/Т=0,45)	R <sub>к</sub> = 210мм	2100
5	С МП и суперпластификатором ПФМ-НЛК	Цемент – 30% МП – 20%, Песок – 50% ПФМ-НЛК – 0,6% В/Ц=0,75 (В/Т=0,45)	R <sub>к</sub> = 230мм	2115
6	С МП и суперпластификатором ПФМ-НЛК	Цемент – 30% МП – 20%, Песок – 50% ПФМ-НЛК – 0,8% В/Ц=0,67 (В/Т=0,4)	R <sub>к</sub> = 260мм	2091
7	С МП и поликарбонатным СП «СТС-01»	Цемент – 30% МП – 20%, Песок – 50% СТС-01 – 0,5% В/Ц=0,6 (В/Т=0,36)	R <sub>к</sub> = 280мм	2160
Примечание: дозировки добавок в процентах от массы цемента приняты в пересчете на сухое вещество.				

За контрольный был принят бездобавочный состав, включающий только цемент и песок в соотношении 1:3 (состав №1). В составе №2 часть песка была заменена на минеральный порошок (МП). Состав №3 отличается от состава №1 наличием добавки – суперпластификатора ПФМ-НЛК в количестве 0,4% от

массы цемента. Состав №4 представляет собой состав №2 с добавлением суперпластификатора ПФМ-НЛК в количестве 0,4% от массы цемента. Составы №5 и №6 отличаются от состава №4 увеличенным расходом суперпластификатора ПФМ-НЛК (0,6% и 0,8% от массы цемента соответственно). В составе №7 вместо суперпластификатора ПФМ-НЛК применен суперпластификатор «СТС-01» на поликарбоксилатной основе в количестве 0,5% от массы цемента (в пересчете на сухое вещество).

Расход воды (водоцементное отношение) при изготовлении составов №1-№4 подбирался исходя из равной подвижности смесей, определяемой по ГОСТ 310.4-81 [124] по расплыву конуса (при 15 ударах встряхивающего столика, по аналогии с методикой СТО 70386662-001-2005 [125]). В составах №1-№4 расплыв конуса был принят равным 200-210мм (смесь средней подвижности). Для состава №5 с увеличенным расходом супер-пластификатора ПФМ-НЛК расплыв конуса был равным 230мм (высокоподвижная смесь), для состава №6 с максимальной рекомендуемой дозировкой суперпластификатора ПФМ-НЛК (0,8% от массы цемента) расплыв конуса составил 260мм, для состава №7 с суперпластификатором на поликарбоксилатной основе «СТС-01» (при дозировке 0,5% от массы цемента) расплыв конуса составил 280мм (текучая или литая смесь).

Изготовление цементно-песчаных смесей производилось в лабораторном смесителе принудительного действия (см. рисунок 3.2). Для обеспечения однородности смеси и увеличения начальной скорости процесса гидратации перемешивание производилось (в соответствии с указаниями СТО 70386662-001-2005 [125]) в течение 180-200 секунд.



Рисунок 3.2 – Смеситель лабораторный для замешивания цементно-песчаной смеси

Определение подвижности цементно-песчаной производилось по методике ГОСТ 310.4-81 [124] с учетом рекомендаций СТО 70386662-001-2005 [125] с использованием лабораторного встряхивающего столика с диаметром диска 300мм. Количество ударов встряхивающего столика было принято (с учетом рекомендаций СТО 70386662-001-2005 [125]) равным 15. Общий вид встряхивающего столика с конусной формой при проведении испытаний представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Встряхивающий столик с конус-формой, заполненной цементно-песчаной смесью

Фотографии замеров расплыва конуса для разных составов цементно-песчаной смеси представлены на рисунках 3.4 - 3.6.



Рисунок 3.4 – Замеры расплыва конуса цементно-песчаной смеси состава №4 ( $R_k = 210\text{мм}$ )



а) – после снятия конуса



б, в) – после 15 ударов  
встряхивающего столика

Рисунок 3.5 – Замеры расплыва конуса цементно-песчаной смеси состава №6 ( $R_k = 260\text{мм}$ )



а – цементно-песчаная смесь после выгрузки из смесителя



б – форма-конус, заполненная цементно-песчаной смесью



в – замер расплыва конуса (Рк = 280мм – литая смесь)



г – формы-балочки и формы-призмы, заполненные цементно-песчаной смесью

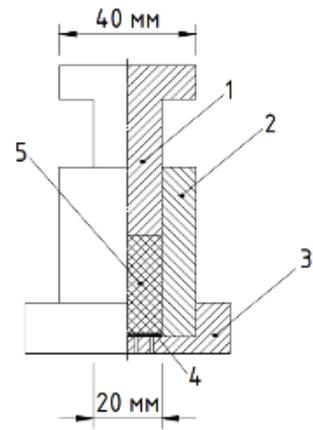
Рисунок 3.6 – Замеры расплыва конуса цементно-песчаной смеси состава №7 (Рк = 280мм)

Помимо подвижности, контролировалась также плотность бетонной смеси по методике ГОСТ 10181-2014 [126] с использованием мерного цилиндрического сосуда объемом  $1000\text{см}^3$ , результаты представлены в таблице 3.7.

Как видно из результатов испытаний, наименьшую плотность (2060-2065 кг/м<sup>3</sup>) имеет цементно-песчаная смесь составов №1 и №2, изготовленная без применения суперпластифицирующих добавок. Составы с пластифицирующей добавкой ПФМ-НЛК (составы №3, 4, 5 и 6) имеют несколько большую плотность (2085-2115 кг/м<sup>3</sup>), что можно объяснить уплотнением смеси за счет водоредуцирования благодаря применению пластифицирующей добавки. Самую большую плотность (2160 кг/м<sup>3</sup>) имеет состав №7, изготовленный с применением суперпластифицирующей добавки на поликарбоксилатной основе «СТС-01». Большую плотность состава №7 по сравнению с составами №4 - №6 можно объяснить тем, что добавка ПФМ-НЛК, согласно её техническому описанию, является комплексной суперпластифицирующей добавкой с эффектом воздухововлечения, в то время как добавка на поликарбоксилатной основе «СТС-01» по своему действию является только суперпластификатором, обладающим сильной водоредуцирующей способностью, а воздухововлекающим эффектом не обладает.

Для изготовления цементно-песчаных образцов по технологии фильтрационного прессования были использованы специальные лабораторные установки и гидравлические прессы П-50 (зав. №3423) и П-10 (зав. № 161). По технологии фильтрационного прессования изготавливались два типа образцов.

Первый тип образцов - цилиндры диаметром  $d = 20\text{мм}$  и высотой  $h$ , равной от 1 до  $1,4d$ . Такие образцы изготавливались с применением стальной цилиндрической пресс-формы, состоящей из днища с отверстиями для отвода воды, матрицы и пуансона, схема формы представлена на рисунке 3.7, фотография пресс-формы (в разобранном виде) – на рисунке 3.8.



*1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – днище с отверстиями для отвода воды,  
4 – фильтр, 5- формируемая смесь.*

**Рисунок 3.7 – Схема пресс-формы для изготовления цилиндрических образцов из цементно-песчаной смеси**



**Рисунок 3.8 – Внешний вид пресс-формы для изготовления цилиндрических образцов из цементно-песчаной смеси (в разобранном виде)**

Режим прессования был принят по рекомендациям, изложенным в работе [61]: набор давления со скоростью 10 МПа/мин, выдержка при рабочем давлении прессования в течение 3 минут, сброс давления. Также время прессования контролировалось по окончанию выделения воды из бетонной смеси, которое составляло 2 - 2,5 минуты. В качестве рабочего давления прессования были рассмотрены давления в диапазоне от 5 до 20 МПа с шагом 5 МПа.

Фотография процесса прессования цилиндрических образцов представлена на рисунке 3.9, изготовленные образцы-цилиндры – на рисунке 3.11. Из смеси мелкозернистого бетона каждого состава при каждом шаге давления были изготовлено по две серии образцов, в каждой серии – по три образца-цилиндра.



а – начало процесса



б – окончание процесса

Рисунок 3.9 – Фотографии процесс фильтрационного прессования цилиндрических образцов

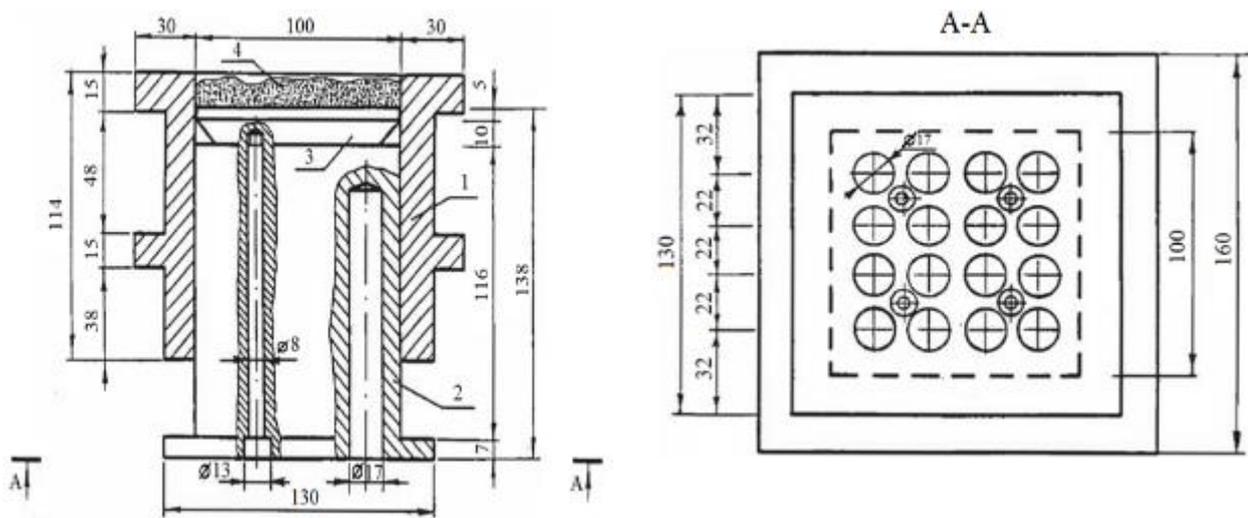


Рисунок 3.10 – Отделение воды в процессе фильтрационного прессования цилиндрических образцов



Рисунок 3.11 – Образец-цилиндр диаметром 20мм, изготовленный по технологии фильтрационного прессования

Второй тип образцов – пластины размером в плане 100×100мм толщиной 10-12 мм (аналогичные по толщине цементно-песчаной черепице). Такие образцы изготавливались с применением специальной стальной формы с полированной верхней поверхностью пуансона, на которой формируется лицевая поверхность образца. При фильтрационном прессовании сверху на пресс-форму (под верхнюю плиту пресса) укладывались два слоя картона (для фильтрования воды) и специальный лист фанеры с продольными бороздками для отвода воды. Принципиальная схема пресс-формы приведена на рисунке 3.12, общий вид пресс-формы приведен на рисунке 3.13.



1 – матрица, 2 – пуансон с пустотами, 3 – стальной вкладыш с полированной поверхностью, 4 – формируемая смесь

Рисунок 3.12 – Схема пресс-формы для изготовления образцов-пластин



Рисунок 3.13 – Общий вид пресс-формы для изготовления образцов-пластин размером 100×100мм

Поэтапный процесс прессования представлен на рисунке 3.14. Первоначальная толщина слоя мелкозернистой бетонной смеси составляла 130-150мм, после завершения процесса фильтрационного прессования толщина образцов составила 100-120мм.



а – цементно-песчаная смесь, уложенная в пресс-форму



б) – начало процесса фильтрационного прессования



в – удаление излишков воды в процессе фильтрационного прессования



г – пластина после извлечения из пресс-формы (видна внутренняя поверхность изделия)

Рисунок 3.14 – Поэтапный процесс фильтрационного прессования образцов-пластин из цементно-песчаного раствора

Параллельно с изготовлением образцов по технологии фильтрационного прессования из той же цементно-песчаной смеси изготавливались образцы-балочки размером 40×40×160мм и образцы-кубы размером 70×70×70мм по стандартной технологии с виброуплотнением на лабораторной виброплощадке СМЖ-539. Фотографии образцов представлены на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Образцы-балочки и образцы-кубы, изготовленные по литьевой технологии с виброуплотнением

Для каждого состава цементно-песчаной смеси изготавливались по две партии образцов каждого вида. Изготовленные образцы после распалубки выдерживались в камере нормального твердения (температура воздуха +23...+25°C, относительная влажность воздуха – 95%) в течение 7 суток (первая партия образцов каждого состава) и 28 суток (вторая партия образцов каждого состава).

### **3.3 Исследование возможности использования вторичного сырья при производстве цементно-песчаной черепицы**

Общеизвестно, что современные тренды развития строительной индустрии предусматривают широкое использование вторичного сырья, что диктуется как экологическими, так и экономическими требованиями. Документально данная тенденция подтверждена утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 17.11.2022г. № 13493п-П11 отраслевой программой «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в

промышленном производстве» [127], основными задачами которой являются создание технологической инфраструктуры вовлечения вторичного сырья в промышленности и увеличение доли продукции, произведенной с использованием вторичного сырья, в общем объеме выпуска продукции в промышленности.

При разработке составов мелкозернистого бетона для изготовления цементно-песчаной черепицы был рассмотрен вопрос применения в качестве одного из компонентов цементно-песчаной смеси вторичного ресурса одного из промышленных предприятий Республики Башкортостан. На основании проведенного литературного поиска [128-130] предложено применение в качестве минеральной добавки минерального продукта содового производства как альтернативы минерального порошка из природных горных пород.

Минеральный продукт содового производства (МПСП) является вторичным ресурсом АО «Башкирская содовая компания» (Республика Башкортостан), его получают в результате сгущения твердой фазы карбонизированной дистиллерной жидкости и ее фильтрации под давлением [128].

МПСП представляет собой твердый кускообразный негорючий материал серого цвета, приобретающий, со временем, под действием атмосферных явлений вид рыхлого материала однородного цвета. На минеральный продукт содового производства (МПСП) разработаны ТУ 2149-334-00203312-2015 [131]. Нормируемые показатели качества МПСП представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Нормируемые показатели качества МПСП

Наименование показателей	Норма	Метод испытания
1	2	3
Внешний вид, цвет	Кускообразный или рыхлый продукт серого цвета	п. 5.4 по ТУ 2149-334-00203312-2015
Массовая доля углекислого кальция и углекислого магния в перерасчете на углекислый кальций, % не менее	60	п. 5.5 по ТУ 2149-334-00203312-2015
Массовая доля влаги, %, не более	35	п. 5.6 по ТУ 2149-334-00203312-2015

## Продолжение таблицы 3.8

1	2	3
Массовая доля сульфатионов в водной вытяжке, % не более	0,5	п. 5.7 по ТУ 2149-334-00203312-2015
Массовая доля хлорид-ионов в водной вытяжке, % не более	4	п. 5.8 по ТУ 2149-334-00203312-2015

Согласно результатам аналитического контроля МПСЦ, массовая доля углекислого кальция и углекислого магния в перерасчете на углекислый кальций составляет в среднем 70-75%, массовая доля влаги составляет от 25 до 35%, содержание хлорид-ионов в водной вытяжке не превышает 4% [130]. Фотографии МПСЦ в естественном состоянии представлены на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Проба МПСЦ в состоянии естественной влажности

В 2021 году в рамках реализации АО «Башкирская содовая компания» комплексной программы по теме: «Исследование возможности применения продуктов переработки минерального продукта содового производства – КЕКа отделения фильтрации дистиллерной жидкости (ОФДЖ) и станции фильтрации шлама рассолоочистки (СФШРО) АО «Башкирская содовая компания» в строительстве, жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве» в

Инновационном центре «Лаборатория нанотехнологий цементных систем имени профессоров А.Ф.Полака и Н.Х.Каримова» Архитектурно-строительного института УГНТУ были проведены исследования минералогического состава 10 проб МПСП, с использованием рентгеновского дифрактометра BRUKER D2 Phaser [132] (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17 – Рентгеновский дифрактометр BRUKER D2 PHASER

Массовая доля влаги во всех предоставленных пробах МПСП составляет от 27,58 до 34,76% (среднее значение 30,7%), что соответствует требованиям ТУ 2149-334-00203312-2015 (не более 35%).



Рисунок 3.18 – Проба МПСП, высушенная до постоянной массы

Примеры рентгенограмм отдельных проб МПСП приведены на рисунках 3.19 и 3.20. Минералогический состав всех проб МПСП в виде сводной таблицы, по данным [132], приведен в таблице 3.9.

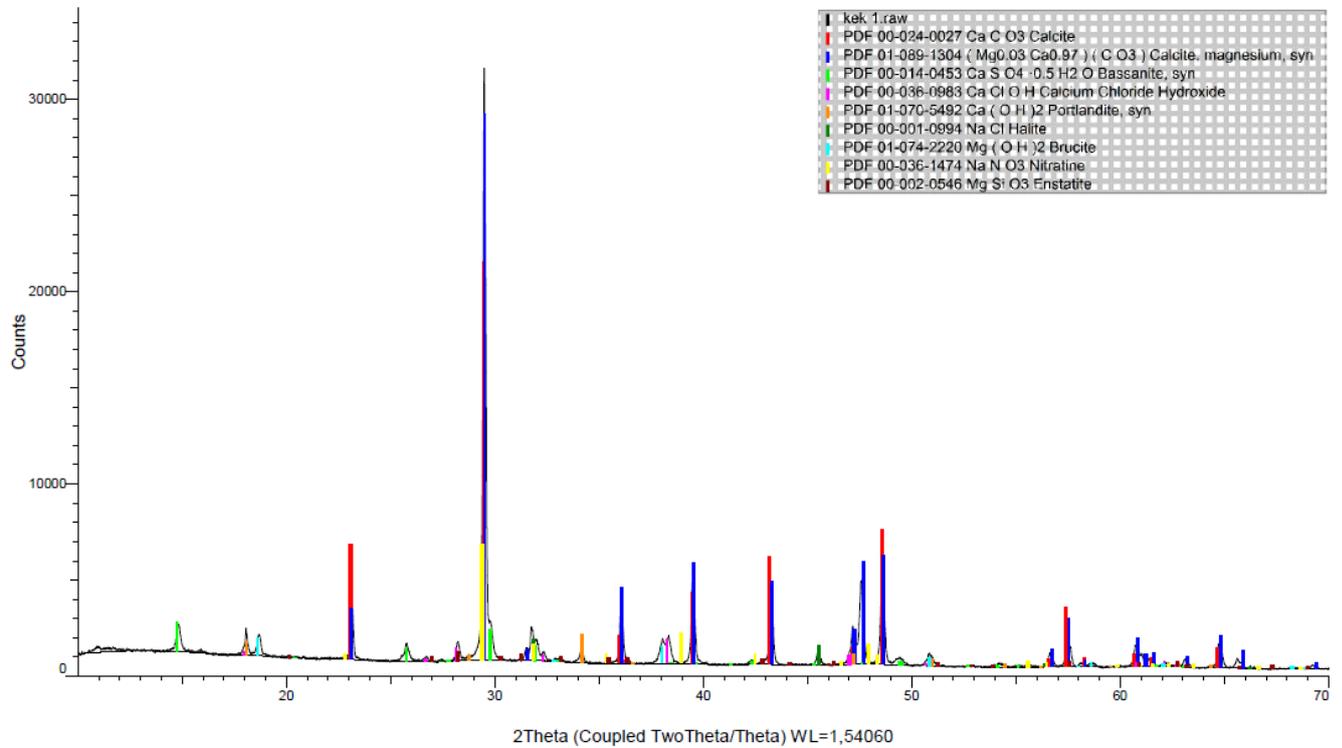


Рисунок 3.19 – Результаты качественного рентгенофазового анализа МПСП (проба №2)

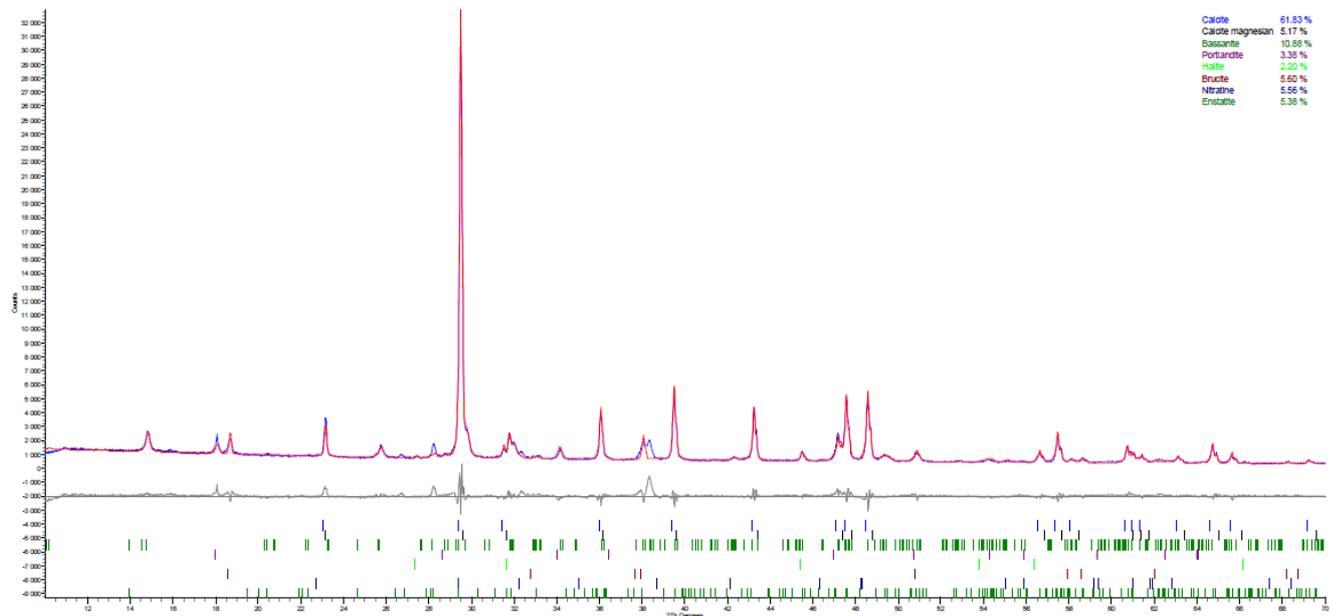


Рисунок 3.20 – Результаты количественного рентгенофазового анализа МПСП (проба №2)

Таблица 3.9 - Сводная таблица результатов рентгенофазового анализа 10 проб МПСП (по данным [132]).

Наименование минерала	№2	№3	№4	№10	№11	№13	№14	№17	№22	№31
Calcite $\text{CaCO}_3$	61,83	50,11	48,67	51,28	49,12	50,40	52,33	58,00	49,39	60,89
Hydrotalcite $(\text{Mg}_{0.67}\text{Al}_{0.33})(\text{OH})_2$ $(\text{CO}_3)_{0.17}(\text{H}_2\text{O})_{0.5}$	-	6,94	6,38	4,90	7,85	8,62	7,68	-	8,41	7,04
Calcite magnesian $(\text{Mg}_{0.03}\text{Ca}_{0.97})(\text{CO}_3)$	5,17	4,93	3,81	3,46	1,46	1,98	1,19	4,57	3,97	-
Monohydrocalcite $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-	2,66	2,23	3,39	3,19	3,80	-	-	2,49	4,52
Magnesite $\text{MgCO}_3$	-	3,32	1,58	-	1,25	2,25	-	-	-	-
Gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	9,51	9,52	9,57	9,75	11,85	11,27	-	12,05	10,28
Bassanite $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	10,88	3,78	2,24	2,03	2,05	-	2,73	10,82	2,82	4,89
Brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$	5,60	4,65	3,83	3,38	3,13	3,83	3,58	4,68	3,75	4,66
Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$	3,38	1,61	1,86	2,44	2,40	2,98	2,61	3,06	1,55	0,61
Nordstrandite $\text{Al}(\text{OH})_3$	-	-	5,38	6,23	4,45	-	3,84	6,99	4,63	3,68
Halite $\text{NaCl}$	2,20	2,44	1,50	2,00	1,92	2,03	1,92	1,41	1,27	2,03
Nitratine $\text{NaNO}_3$	5,56	5,29	7,41	4,58	7,21	6,25	6,27	3,67	6,25	1,40
Enstatite $\text{MgSiO}_3$	5,38	4,77	5,21	6,41	5,72	5,54	6,13	6,79	3,42	-
Quartz $\text{SiO}_2$	-	-	0,38	0,33	0,50	0,48	0,43	-	-	-

Минералогический состав МПСП, по данным [132] представлен преимущественно карбонатом кальция  $\text{CaCO}_3$  (от 49 до 61%), также в составе имеются карбонатные минералы моногидрокальцит  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , магнезиальный кальцит  $(\text{Mg}_{0.03}\text{Ca}_{0.97})(\text{CO}_3)$  и магнезит  $\text{MgCO}_3$ . Содержание гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  составляет от 1,5 до 3,4%, содержание гидроксида магния  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  составляет от 3,1 до 5,6%. Таким образом, содержание  $(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{акт}}$  находится в пределах от 5 до 8%, но при этом содержание  $\text{MgO}$  больше содержания  $\text{CaO}$ . Какими-либо значительными гидравлическими вяжущими свойствами МПСП не

обладает. Также МПСП содержит определенное количество полуводного  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  и двухводного  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и гипса (в сумме от 10 до 15%).

На основании результатов исследований в качестве возможных областей применения МПСП в строительстве были предложены следующие [132]:

а) как активного компонента:

- в качестве компонента сульфатно-шлакового вяжущего;

б) как инертной минеральной добавки:

- в качестве карбонатного наполнителя в составе вяжущих низкой водопотребности (цемента низкой водопотребности);

- в качестве инертной карбонатной минеральной добавки (минерального наполнителя) в составы бетонных и растворных смесей;

- в качестве исходного сырья при изготовлении минерального порошка для применения в составе асфальтобетонных смесей.

В рамках выполнения диссертационной работы были проведены исследования по возможности использования МПСП (после сушки и предварительного измельчения) в качестве инертной минеральной добавки при производстве цементно-песчаной черепицы взамен минерального порошка из природных карбонатных пород. По своим характеристикам высушенный и измельченный МПСП соответствует техническим требованиям ГОСТ 56592-2015 [133], и может быть отнесен к инертным минеральным добавкам. Таким образом, исходя из минералогического и зернового состава, а также проведенных предварительных экспериментальных исследований, при изготовлении цементно-песчаной черепицы возможна замена в составе цементно-песчаной смеси минерального порошка МП-2, выполняющего функцию инертной минеральной добавки, на такое же количество высушенного и измельченного МПСП, что не приводит к ухудшению как технологических свойств (подвижность и водоудерживающая способность смеси), так и прочностных свойств затвердевшего бетона.

### 3.4 Определение физико-механических характеристик образцов цементно-песчаных композитов различных составов

Испытание изготовленных образцов цементно-песчаных смесей составов, представленных в таблице 3.7, выполнялось по следующим показателям:

- балочек, изготовленных по вибролитьевой технологии – по показателям «плотность в естественном состоянии» (ГОСТ 12730.1-78 [134]), «прочность на растяжение при изгибе» и «прочность на сжатие» (ГОСТ 310.4-81 [124]);

- кубов, изготовленных по вибролитьевой технологии – по показателям «плотность в естественном состоянии» (ГОСТ 12730.1-78 [134]) и «водопоглощение по массе» (ГОСТ 12730.3-78 [135]).

- цилиндров, изготовленных по технологии фильтрационного прессования – по показателям «плотность в естественном состоянии» (ГОСТ 12730.1-78 [134]), «водопоглощение по массе» (ГОСТ 12730.3-78 [135]) и «прочность при сжатии» (ГОСТ 10180-2012 [136]);

- пластин, изготовленные по технологии фильтрационного прессования – по показателю «плотность в естественном состоянии» (ГОСТ 12730.1-78 [134]), «водопоглощение по массе» (ГОСТ 12730.3-78 [135]), а также визуально оценивалось качество лицевой поверхности;

Результаты испытания образцов-балочек, изготовленных по литьевой технологии, представлены в таблицах 3.10 и 3.11.

Таблица 3.10 – Результаты испытания образцов-балочек размером 40×40×160мм в возрасте 7 суток нормального твердения

Номер образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при изгибе, МПа		Предел прочности при сжатии, МПа	
	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов
1	2	3	4	5	6	7
Б-1-1	2096	2088	3,70	3,62	15,3	14,5
Б-1-2	2102		3,54		13,7	
Б-1-3	2076		3,62		14,4	
Б-2-1	2095	2085	4,27	4,25	20,6	21,2
Б-2-2	2070		4,33		20,8	
Б-2-3	2090		4,15		22,1	

Продолжение таблицы 3.10

1	2	3	4	5	6	7
Б-3-1	2132	2134	4,24	4,30	18,0	17,8
Б-3-2	2140		4,32		17,4	
Б-3-3	2130		4,34		18,0	
Б-4-1	2141	2128	4,35	4,41	25,1	23,8
Б-4-2	2126		4,37		22,8	
Б-4-3	2117		4,51		23,6	
Б-5-1	2137	2132	4,38	4,45	24,2	23,1
Б-5-2	2131		4,53		23,0	
Б-5.3	2128		4,44		22,1	
Б-6-1	2140	2134	4,88	4,92	22,3	23,2
Б-6-2	2128		4,97		23,4	
Б-6-3	2134		4,91		23,9	
Б-7-1	2172	2175	5,96	5,90	26,6	25,9
Б-7-2	2177		5,85		26,2	
Б-7-3	2176		5,90		25,1	

Таблица 3.11 – Результаты испытания образцов-балочек размером 40×40×160мм в возрасте 28 суток нормального твердения

Номер образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при изгибе, МПа		Предел прочности при сжатии, МПа	
	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов
Б-1-4	2086	2096	4,69	5,00	20,6; 18,2	19,6
Б-1-5	2104		4,92		19,0; 19,1	
Б-1-6	2098		5,39		18,6; 21,9	
Б-2-4	2092	2092	5,62	6,09	33,1; 29,9	29,8
Б-2-5	2083		6,56		27,5; 25,4	
Б-2-6	2102		6,09		31,3; 31,4	
Б-3-4	2126	2130	5,86	6,01	23,6; 23,8	25,3
Б-3-5	2124		5,62		24,0; 24,2	
Б-3-6	2140		6,56		22,7; 22,0	
Б-4-4	2136	2136	6,19	6,15	28,8; 29,1	32,1
Б-4-5	2141		5,86		34,0; 35,6	
Б-4-6	2131		6,39		32,3; 33,1	
Б-5-4	2140	2133	6,56	6,25	35,1; 33,9	33,5
Б-5-5	2133		6,26		35,5; 32,6	
Б-5-6	2125		5,92		31,7; 33,3	
Б-6-4	2130	2125	6,73	6,89	32,8; 30,9	32,8
Б-6-5	2112		6,73		34,8; 35,4	
Б-6-6	2133		7,20		32,0; 31,1	
Б-7-4	2166	2167	8,45	8,47	39,9; 32,6	35,7
Б-7-5	2176		8,91		37,4; 34,8	
Б-7-6	2158		8,05		34,5; 35,1	

Результаты испытания образцов-кубов, изготовленных по литьевой технологии, по показателям «плотность в естественном состоянии» и «водопоглощение по массе» представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты испытания образцов-кубов размером 70×70×70мм в возрасте 28 суток нормального твердения

Номер образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		Водопоглощение образцов, %	
	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов
К-1-1	2102	2101	12,2	12,0
К-1-2	2092		11,9	
К-1-3	2109		12,0	
К-2-1	2086	2092	11,2	11,7
К-2-2	2099		11,0	
К-2-3	2091		11,4	
К-3-1	2154	2136	9,7	9,4
К-3-2	2121		9,3	
К-3-3	2134		9,2	
К-4-1	2127	2130	7,5	7,7
К-4-2	2120		7,7	
К-4-3	2142		8,0	
К-5-1	2144	2142	7,8	7,8
К-5-2	2149		8,1	
К-5-3	2132		7,6	
К-6-1	2144	2139	7,1	7,5
К-6-2	2128		7,6	
К-6-3	2145		7,7	
К-7-1	2186	2182	6,0	6,1
К-7-2	2196		5,8	
К-7-3	2165		6,5	

Результаты испытания образцов-цилиндров, изготовленных по технологии фильтрационного прессования при давлении прессования, равном 15 МПа, в возрасте 7 и 28 суток нормального твердения, приведены в таблицах 3.13 и 3.14.

Таблица 3.13 – Результаты испытания образцов-цилиндров диаметром 20мм в возрасте 7 суток нормального твердения

Номер образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при сжатии, МПа	
	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения (с учетом коэф. 0,7)	Среднее значение для серии образцов
1	2	3	4	5
Ц-1-1	2180	2180	21,6	22,5
Ц-1-2	2185		22,3	
Ц-1-3	2174		23,7	

Продолжение таблицы 3.13

1	2	3	4	5
Ц-2-1	2233	2240	35,3	37,9
Ц-2-2	2249		41,8	
Ц-2-3	2238		36,7	
Ц-3-1	2215	2222	32,9	32,0
Ц-3-2	2226		31,1	
Ц-3-3	2225		32,2	
Ц-4-1	2273	2270	44,8	43,4
Ц-4-2	2271		41,9	
Ц-4-3	2266		43,6	
Ц-5-1	2285	2285	42,0	43,5
Ц-5-2	2289		43,6	
Ц-5-3	2280		45,0	
Ц-6-1	2288	2280	44,8	44,5
Ц-6-2	2272		46,0	
Ц-6-3	2281		42,9	
Ц-7-1	2315	2310	49,5	51,3
Ц-7-2	2309		51,4	
Ц-7-3	2036		52,9	

Таблица 3.14 – Результаты испытания образцов-цилиндров диаметром 20мм в возрасте 28 суток нормального твердения

Номер образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		Предел прочности при сжатии, МПа		Водопоглощение по массе, %	
	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения (с учетом коэф. 0,7)	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов
1	2	3	4	5	6	7
Ц-1-4	2215	2191	29,6	29,2	5,3	5,1
Ц-1-5	2160		28,5		4,9	
Ц-1-6	2198		29,5		5,1	
Ц-2-4	2250	2248	47,9	47,5	4,8	4,6
Ц-2-5	2274		47,6		4,5	
Ц-2-6	2220		47,0		4,5	
Ц-3-4	2226	2226	40,9	40,6	4,2	4,0
Ц-3-5	2243		42,1		4,0	
Ц-3-6	2215		38,8		3,7	
Ц-4-4	2288	2284	55,3	54,7	3,7	3,7
Ц-4-5	2296		54,2		3,5	
Ц-4-6	2276		54,6		3,9	
Ц-5-4	2295	2290	55,0	55,2	3,8	3,6
Ц-5-5	2291		55,5		3,7	
Ц-5-6	2284		55,1		3,4	
Ц-6-4	2270	2275	54,9	54,4	3,5	3,6
Ц-6-5	2291		53,8		3,7	
Ц-6-6	2264		54,5		3,6	

Продолжение таблицы 3.14

1	2	3	4	5	6	7
Ц-7-4	2299	2316	66,0	64,8	3,1	2,9
Ц-7-5	2327		64,5		2,8	
Ц-7-6	2323		63,9		2,8	

Результаты испытания образцов-пластин, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, по показателям «плотность» и «водопоглощение» представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Результаты испытания образцов-пластин размером 100×100×10мм в возрасте 28 суток нормального твердения

Номер образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>		Водопоглощение по массе, %	
	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов	Единичные значения	Среднее значение для серии образцов
П-1-1	2187	2183	6,5	6,3
П-1-2	2179		6,7	
П-2-1	2231	2234	5,3	5,4
П-2-2	2237		5,5	
П-3-1	2203	2205	5,1	5,1
П-3-2	2207		5,1	
П-4-1	2273	2269	4,8	4,6
П-4-2	2265		4,4	
П-5-1	2272	2276	4,5	4,4
П-5-2	2280		4,3	
П-6-1	2260	2267	4,5	4,5
П-6-2	2274		4,6	
П-7-1	2285	2305	3,8	3,9
П-7-2	2326		4,0	

Обобщенные результаты определения плотности цементно-песчаных образцов сведены в таблицу 3.16. Для наглядности данные по плотности затвердевших цементно-песчаных образцов оформлены в виде графиков, представленных на рисунке 3.21.

Таблица 3.16 – Обобщенные результаты испытаний цементно-песчаных образцов по показателю «плотность в естественном состоянии» (в возрасте 28 суток н.т.)

Номер состава	Плотность, кг/м <sup>3</sup>				
	Растворная цементно-песчаная смесь	Образцы по литьевой технологии (балочки)	Образцы по литьевой технологии (кубы)	Образцы по методу фильтрования (цилиндры)	Образцы по методу фильтрования (пластины)
1	2064	2096	2101	2191	2183
2	2062	2092	2092	2248	2234
3	2096	2130	2136	2226	2205
4	2100	2136	2130	2284	2269
5	2115	2133	2142	2290	2276
6	2091	2125	2139	2275	2267
7	2160	2167	2182	2316	2305

Как видно из таблицы 3.16, наименьшую плотность (2060-2065 кг/м<sup>3</sup>) имеет цементно-песчаная смесь составов №1 и №2 (без суперпластифицирующей добавки), смесь составов №3 - №6 (с добавкой ПФМ-НЛК) имеет плотность в пределах от 2091 до 2115 кг/м<sup>3</sup>, наибольшую плотность (2160 кг/м<sup>3</sup>) имеет цементно-песчаная смесь состава №7 (с СП на поликарбоксилатной основе).

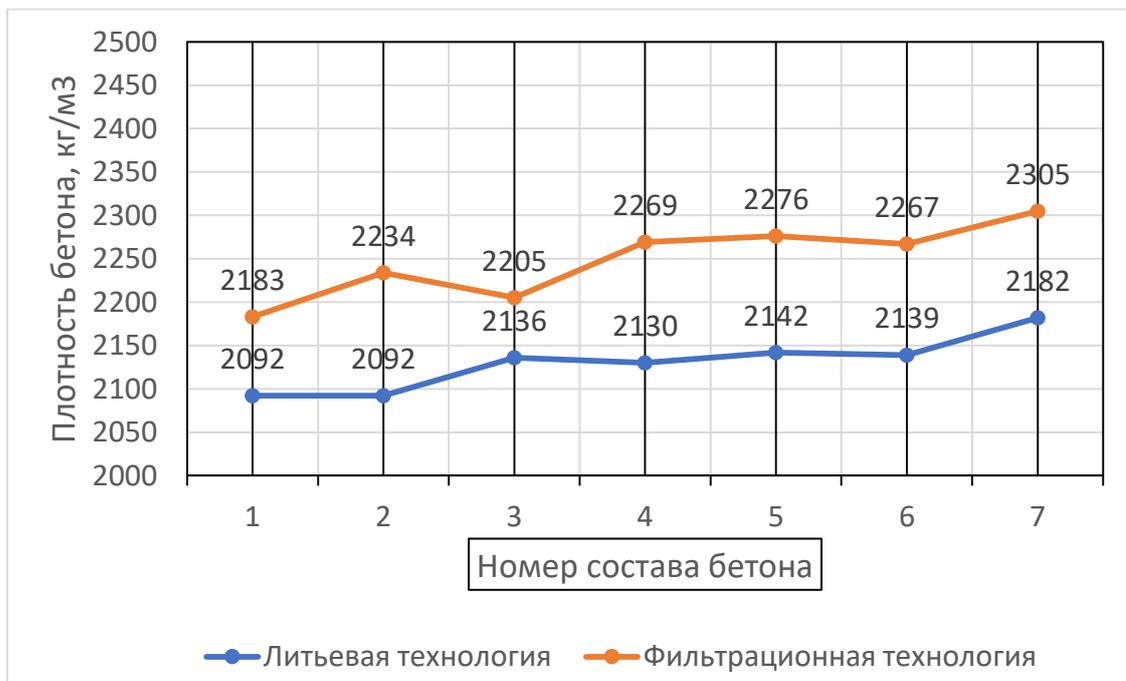


Рисунок 3.21 – Плотность цементно-песчаных образцов разных составов, изготовленных по литьевой технологии и технологии ФП.

Как видно из результатов испытаний, плотность цементно-песчаного раствора готовых образцов значительно различается в зависимости от состава растворной смеси и технологии их изготовления. В частности, образцы цементно-песчаного раствора составов №1 и №2 (без суперпластификатора), изготовленные по литевой технологии, имеют плотность 2090-2100 кг/м<sup>3</sup>. Образцы раствора составов №3 - №6 (с суперпластификатором ПФМ-НЛК) имеют плотность в пределах от 2130 до 2140 кг/м<sup>3</sup>. Плотность бетона образцов состава №7 еще более высокая (2170-2180 кг/м<sup>3</sup>), что объясняется применением более сильного суперпластификатора на поликарбоксилатной основе, а также отсутствием у этого суперпластификатора эффекта воздухововлечения, характерного для добавки ПФМ-НЛК.

Образцы бетона, изготовленные по технологии фильтрационного прессования (как цилиндры, так и пластины), имеют значительно большую плотность, чем образцы, изготовленные по литевой технологии (в среднем на 100-130 кг/м<sup>3</sup>), что обеспечивает большую прочность и меньшую проницаемость таких образцов. Необходимо отметить, что значительное влияние на плотность мелкозернистого бетона, изготовленного по технологии фильтрационного прессования, оказывает наличие в составе бетонной смеси минерального наполнителя. Если для образцов, изготовленных по литевой технологии, плотность бетона образцов составов №3 и №4 (с суперпластификатором) выше, чем у образцов состава №2 (без суперпластификатора, но с минеральным порошком), то для образцов, изготовленных по технологии фильтпрессования, плотность бетона образцов состава №2 (без СП, но с МП) выше, чем образцов состава №3 (с СП, но без МП), а плотность образцов состава №4 (с СП и МП) значительно выше плотности образцов состава №3. Это можно объяснить тем, что при технологии фильтрационного прессования при удалении излишков воды важнейшим фактором, определяющим формирование плотной структуры, становится непрерывность гранулометрического состава заполнителей и наполнителей, и в рассматриваемом случае (составы №2, №4) зерна минерального порошка

занимают пространство между зернами песка, ранее (составы №1 и №3) заполненное только цементным камнем (гелем), что позволяет получить более плотную структуру бетона.

Результаты определения прочности образцов цементно-песчаного раствора сведены в таблицу 3.17. Для наглядности данные по прочности затвердевших цементно-песчаных образцов оформлены в виде графиков, представленных на рисунке 3.22.

Таблица 3.17 – Обобщенные результаты испытаний цементно-песчаных образцов по показателю «прочность при сжатии»

Номер состава	Прочность на сжатие, МПа		Изменение прочности по методу фильтр-прессования, %, в возрасте 28 суток н.т.
	Образцы по литьевой технологии (балочки) в возрасте 7/28 суток н.т.	Образцы по методу фильтр-прессования (цилиндры) в возрасте 7/28 суток н.т.	
1	14,5 / 19,6	22,5 / 29,2	+48
2	21,2 / 29,8	37,9 / 47,5	+59
3	17,8 / 25,3	32,0 / 40,6	+60
4	23,8 / 32,1	43,4 / 54,7	+70
5	23,1 / 33,5	43,5 / 55,2	+65
6	23,2 / 32,8	44,5 / 54,4	+67
7	25,9 / 35,7	51,3 / 64,8	+82

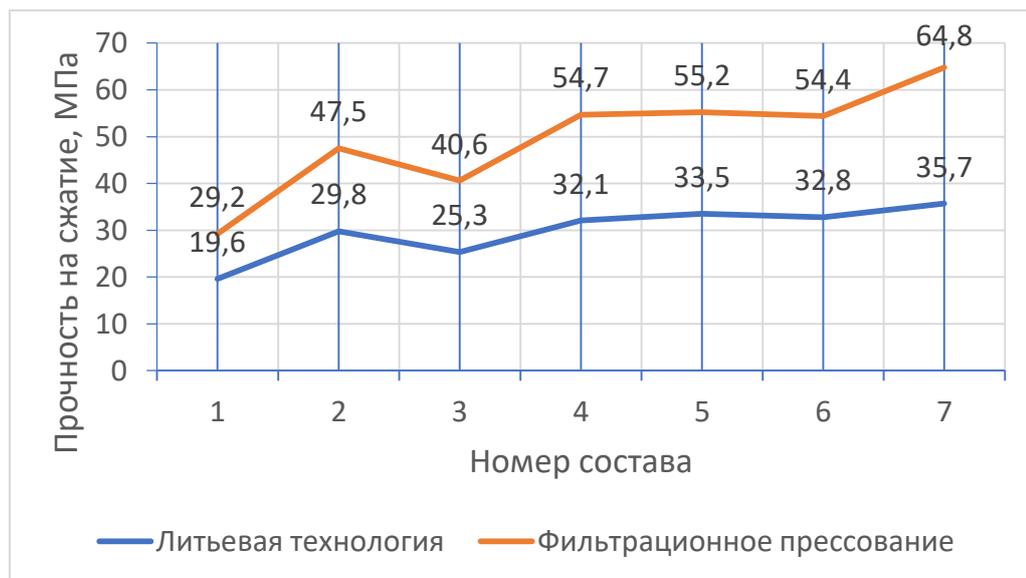


Рисунок 3.22 – Прочность при сжатии цементно-песчаных образцов разных составов, изготовленных по литьевой технологии и технологии ФП

Результаты испытаний, представленные в таблице 3.17, показывают, что наименьшую прочность (как для литевой, так и для фильтрационной технологии) имеют образцы состава №1 (без СП и МП), при этом образцы по фильтрационной технологии прочнее на 48%. Более прочными являются образцы состава №3 (без МП, но с СП), еще более прочными – образцы состава №2 (без СП, но с МП), при этом образцы по фильтрационной технологии показали прочность в среднем на 60% выше, чем по литевой технологии. Образцы составов №4-№6 (с МП и СП, различаются расходом суперпластификатора) имеют близкие значения прочности (32-34 МПа – для литевой технологии, 54-56 МПа – для технологии ФП), при этом прочность образцов по технологии фильтрационного прессования на 65-70% выше. Наибольшую прочность показывают образцы состава №7 (35,7 и 64,8 МПа соответственно), прочность образцов данного состава по технологии фильтрационного прессования на 80% выше, чем по литевой технологии.

Также следует отметить, что для цементно-песчаных композитов, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, характерным является ускоренный набор прочности, прочность при сжатии в возрасте 7 суток составляет 75-82% от 28-суточной.

Результаты определения водопоглощения образцов цементно-песчаного раствора сведены в таблицу 3.18 и для наглядности в виде графиков представлены на рисунке 3.23.

Таблица 3.18 – Обобщенные результаты определения водопоглощения цементно-песчаных образцов.

Номер состава	Водопоглощение по массе, %		
	Образцы по литевой технологии (кубы)	Образцы по методу фильтр-прессования (цилиндры)	Образцы по методу фильтр-прессования (пластины)
1	12,0	5,1	6,3
2	11,7	4,6	5,4
3	9,4	4,0	5,1
4	7,7	3,7	4,6
5	7,8	3,6	4,4
6	7,5	3,6	4,5
7	6,1	2,9	3,9

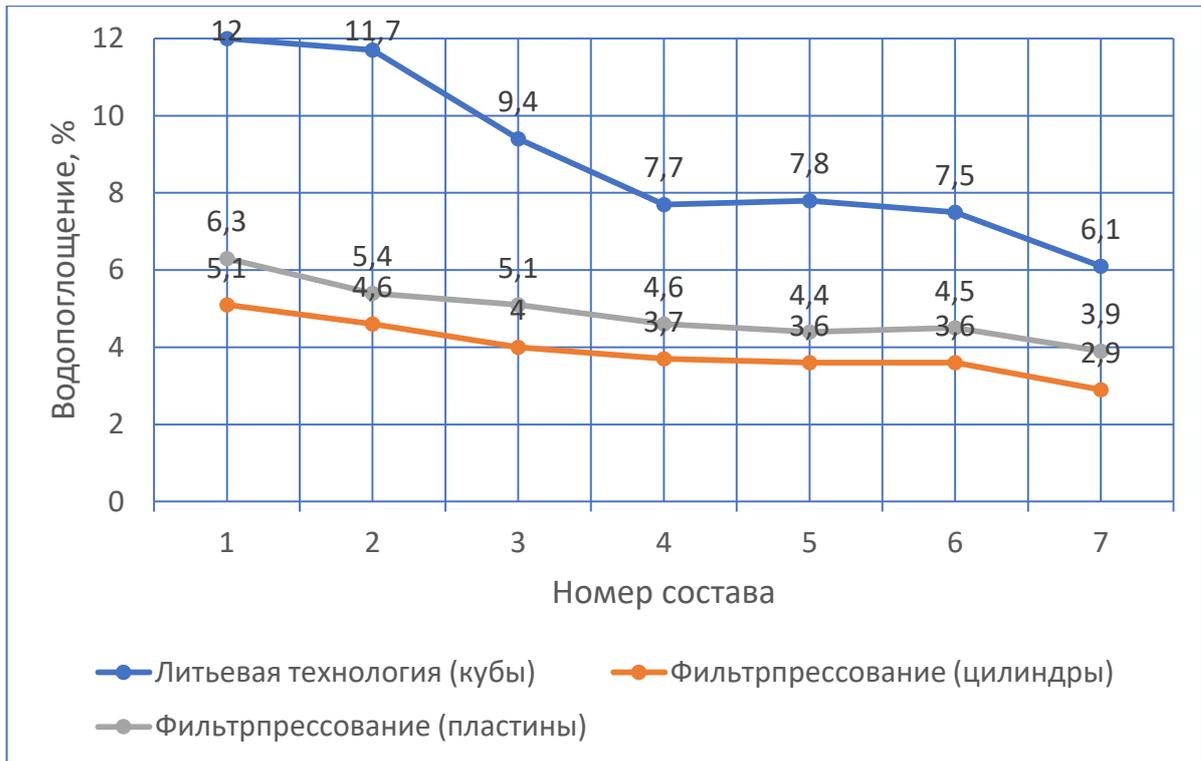


Рисунок 3.23 – Водопоглощение цементно-песчаных образцов, изготовленных по литьевой технологии и технологии ФП

Как видно из таблицы 3.18 и рисунка 3.23, водопоглощение образцов, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, в 2-2,5 раза ниже водопоглощения образцов, изготовленных по литьевой технологии. Несколько более высокое водопоглощение образцов-пластин по сравнению с образцами-цилиндрами можно объяснить тем, что нижняя поверхность пластин, соприкасающаяся при изготовлении образцов с фильтрующим материалом, имеет более высокую пористость, чем остальные грани образца.

Как уже было отмечено ранее, важнейшим свойством цементно-песчаной черепицы является качество её лицевой поверхности, которое напрямую влияет на другие свойства изделий. При выполнении работы качество лицевой поверхности образцов-пластин из цементно-песчаного раствора, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, оценивалось визуально и путем замеров имеющихся дефектов поверхности штангенциркулем. Фотографии характерных образцов из цементно-песчаной смеси различного состава с описанием качества их поверхности представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Качество лицевой поверхности образцов-пластин, изготовленных по технологии фильтрационного прессования.

Номер образца	Фотография поверхности	Описание поверхности
1	2	3
П-1-2		<p>На поверхности много мелких и крупных пор диаметром до 2-3мм. Качество поверхности наихудшее из всех составов.</p>
П-2-1		<p>На поверхности имеются некоторое количество мелких пор диаметром до 1мм. Качество поверхности лучше, чем у составов №1 и №3, но хуже, чем у остальных составов</p>
П-3-2		<p>На поверхности имеется значительное количество мелких пор диаметром. Качество поверхности лучше, чем у состава №1, но хуже чем у остальных составов</p>

Продолжение таблицы 3.19

1	2	3
П-4-1		<p>На поверхности имеется незначительное количество мелких пор диаметром до 0,5мм. Поверхность очень гладкая. Качество поверхности лучше, чем у составов №1, №2 и №3, но хуже, чем у состава №5</p>
П-6-2		<p>На поверхности имеется некоторое количество мелких пор диаметром до 0,7мм. Поверхность очень гладкая. Качество поверхности лучше, чем у составов №1, №2 и №3, но хуже, чем у состава №5</p>
П-7-1		<p>Поры на поверхности отсутствуют, поверхность очень гладкая, с глянцевым блеском. Качество поверхности наилучшее из всех составов</p>

Как видно из таблицы 3.19, наихудшее качество поверхности имеют образцы составов №1 и №3, изготовленные без применения минерального наполнителя. Несколько лучше по качеству лицевая поверхность образца состава №2 (с минеральным порошком, но без суперпластификатора). Удовлетворительное качество имеет поверхность образцов составов №4, №5 и №6, изготовленных из смеси с высокой подвижностью, имеющих в составе суперпластификатор и минеральный наполнитель. Наилучшее качество лицевой поверхности (гладкая поверхность без пор, с глянцевым блеском) имеет образец состава №7, изготовленный из высокопластичной (литой) цементно-песчаной смеси с добавкой минерального наполнителя, но при этом имеющую за счет применения высококачественного суперпластификатора на поликарбонатной основе пониженное водотвердое отношение ( $V/T = 0,36$ ).

Испытание образцов мелкозернистого бетона состава №7 (квадратных пластин размером  $100 \times 100 \times 10$  мм) на морозостойкость выполняется в соответствии с ГОСТ 10060-2012 по первому базовому методу (замачивание в воде, замораживание в воздушной среде при температуре минус  $18^\circ\text{C}$ , оттаивание в воде при температуре  $+20^\circ\text{C}$ ). Образцы выдержали без каких-либо признаков разрушения 200 циклов попеременного замораживания-оттаивания.

### **3.5 Выводы по третьей главе**

1. Для изготовления цементно-песчаных кровельных изделий с качественной лицевой поверхностью наилучшим образом подходят высокоподвижные цементно-песчаные смеси с тонкомолотым минеральным наполнителем, имеющие при этом относительно низкое  $V/T$  за счет применения высококачественных суперпластифицирующих добавок.

2. При изготовлении цементно-песчаной черепицы возможно применение в составе цементно-песчаной смеси высушенного минерального продукта содового производства в качестве инертной минеральной добавки взамен минерального порошка из природных карбонатных пород.

#### **4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ**

##### **4.1 Оценка степени влияния основных факторов на свойства цементно-песчаных композитов, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования**

Как было установлено ранее (см. главу 3), для изготовления цементно-песчаных кровельных изделий с качественной лицевой поверхностью наилучшим образом подходят высокоподвижные цементно-песчаные смеси с минеральным наполнителем, имеющие при этом низкое В/Т за счет применения суперпластифицирующих добавок. Для дальнейших исследований по получению высокопрочных цементно-песчаных композитов по технологии фильтрационного прессования в качестве исходного состава принят мелкозернистый бетон с соотношением цемент : песок = 1 : 2. Водотвердое отношение (В/Т) подбиралось из условия получения высокоподвижной цементно-песчаной смеси ( $R_k = 270-280\text{мм}$ ) при постоянном расходе поликарбоксилатного суперпластификатора СТС-01 (0,6% от массы цемента + наполнителя) за счет корректировки расхода воды, при этом фиксировалось начальное В/Т. Приготовленная цементно-песчаная смесь укладывалась в пресс-форму и производилось прессование по заданному режиму, определенному исходя из ранее выполненных экспериментов: набор давления со скоростью 10 МПа/мин, выдержка при рабочем давлении прессования в течение 3 минут, сброс давления. После завершения процесса фильтрационного прессования производилось взвешивание образцов с целью определения остаточного В/Т.

Как указывается рядом авторов [60, 61], а также подтверждено предварительными экспериментами (см. главу 3) на физико-механические свойства цементно-песчаных композиций (мелкозернистых бетонов),

получаемых методом фильтрационного прессования, значительно влияют и величина прессующего давления, обуславливающего степень уплотнения материала, а также наличие в составе цементно-песчаной смеси инертного или малоактивного тонкомолотого минерального наполнителя, улучшающего отвод воды в процессе прессования. В связи с вышеизложенным, при проведении экспериментальных исследований по получению высокопрочных структур на основе цементных композитов методом фильтрационного прессования был разработан план экспериментальных исследований, согласно которому входными факторами, влияющими на прочность цементно-песчаного композита, принимались:

-  $X_1$  – процент замены цемента на тонкомолотый минеральный наполнитель в составе смеси;

-  $X_2$  - давление прессования, МПа.

Для проведения полного факторного эксперимента были приняты:

- для фактора  $X_1$  –  $p_3 = 7$  уровней (процент замены цемента на тонкомолотый минеральный наполнитель в количестве 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60%);

- для фактора  $X_2$  –  $p_3 = 5$  уровней (давление прессования принято равным 0 (литьевая технология), 5, 10, 15 и 20 МПа).

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.1. Матрица планирования эксперимента строилась исходя из принципа симметричности относительно центра эксперимента. Каждая строка в данной матрице соответствует проведенному опыту (результаты каждого опыта определялись как среднее значение результатов испытаний двух образцов). Количество опытов при проведении эксперимента составило  $N_3 = p_{31} \times p_{32} = 7 \times 5 = 35$ .

Для удобства результаты экспериментов сведены в таблицу 4.2 и представлены в виде графиков на рисунке 4.1.

Таблица 4.1 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Исучаемые факторы		Результаты опытов: прочность при сжатии в возрасте 28 суток н.т., МПа	Номер опыта	Исучаемые факторы		Результаты опытов: прочность при сжатии в возрасте 28 суток н.т., МПа
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>			Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	
1	0	0	40,5	19	40	10	57,6
2	10	0	41,0	20	50	10	55,2
3	20	0	39,6	21	60	10	51,0
4	30	0	37,9	22	0	15	64,8
5	40	0	35,7	23	10	15	66,0
6	50	0	32,2	24	20	15	65,8
7	60	0	29,8	25	30	15	65,2
8	0	5	49,8	26	40	15	65,0
9	10	5	50,8	27	50	15	63,4
10	20	5	51,7	28	60	15	61,5
11	30	5	50,5	29	0	20	69,0
12	40	5	49,4	30	10	20	70,1
13	50	5	48,3	31	20	20	69,4
14	60	5	45,6	32	30	20	68,3
15	0	10	58,2	33	40	20	68,1
16	10	10	59,5	34	50	20	66,5
17	20	10	59,0	35	60	20	63,0
18	30	10	58,3				

Таблица 4.2 – Прочность на сжатие мелкозернистого бетона после 28 суток нормального твердения в зависимости от содержания в составе смеси ТМН и давления прессования

Соотношение компонентов Ц/МП, % по массе	Прочность при сжатии при литьевой технологии	Прочность при сжатии в возрасте 28 суток н.т., МПа, при давлении прессования			
		5 МПа	10 МПа	15 МПа	20 МПа
100 : 0	40,5	49,8	58,2	64,8	69,0
90 : 10	41,0	50,8	59,5	66,0	70,1
80 : 20	39,6	51,7	59,0	65,8	69,4
70 : 30	37,9	50,5	58,3	65,2	68,3
60 : 40	35,7	49,4	57,6	65,0	68,1
50 : 50	32,2	48,3	55,2	63,4	66,5
40 : 60	29,8	45,6	51,0	61,5	63,0

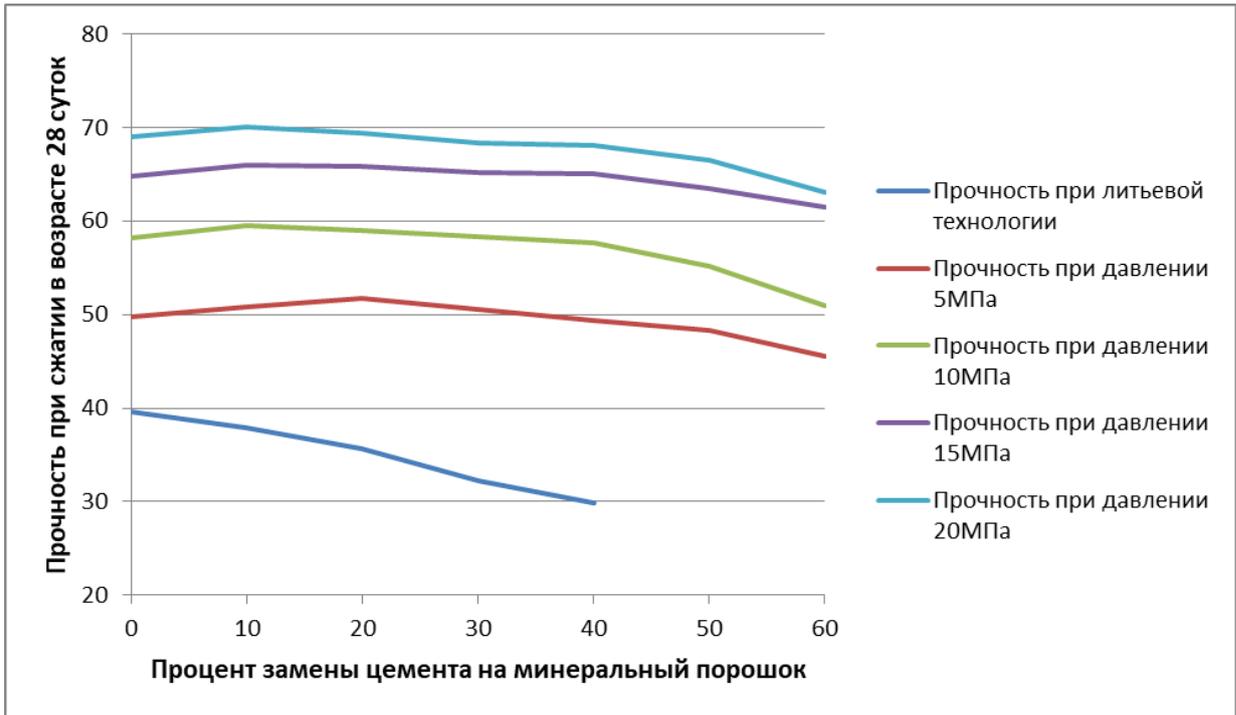


Рисунок 4.1 – Графики зависимости прочности образцов мелкозернистого бетона от содержания ТМН и давления прессования

Исходя из матрицы планирования и результатов экспериментов была получена следующая математическая модель (регрессия) в виде функции отклика  $y(R_{сж}^{28})$ :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 \quad (4.1)$$

где  $y$  – прочность при сжатии в возрасте 28 суток, МПа;

$x_1$  – содержание тонкомолотого наполнителя в составе смеси, %

$x_2$  – давление прессования, МПа.

$$y = 39,1349 + 0,0982x_1 + 2,5557x_2 + 0,0033x_1x_2 - 0,0041x_1^2 - 0,0558x_2^2 \quad (4.2)$$

Коэффициенты модели  $a_i$  найдены методом меньших квадратов при помощи компонента «Анализ данных» MS Excel. Для проверки адекватности (достоверности или применимости для принятия решения) построенной модели использован критерий Фишера. Расчетное значение критерия для построенной модели (4.2) составило  $F_{расч}=513$ , критическое значение  $F_{крит}=2,49$  для уровня значимости 0,05, что свидетельствует о достоверности модели с вероятностью 95% применимости разработанной модели в научных исследованиях.

Графическая интерпретация полученных зависимостей представлена на рисунке 4.2.

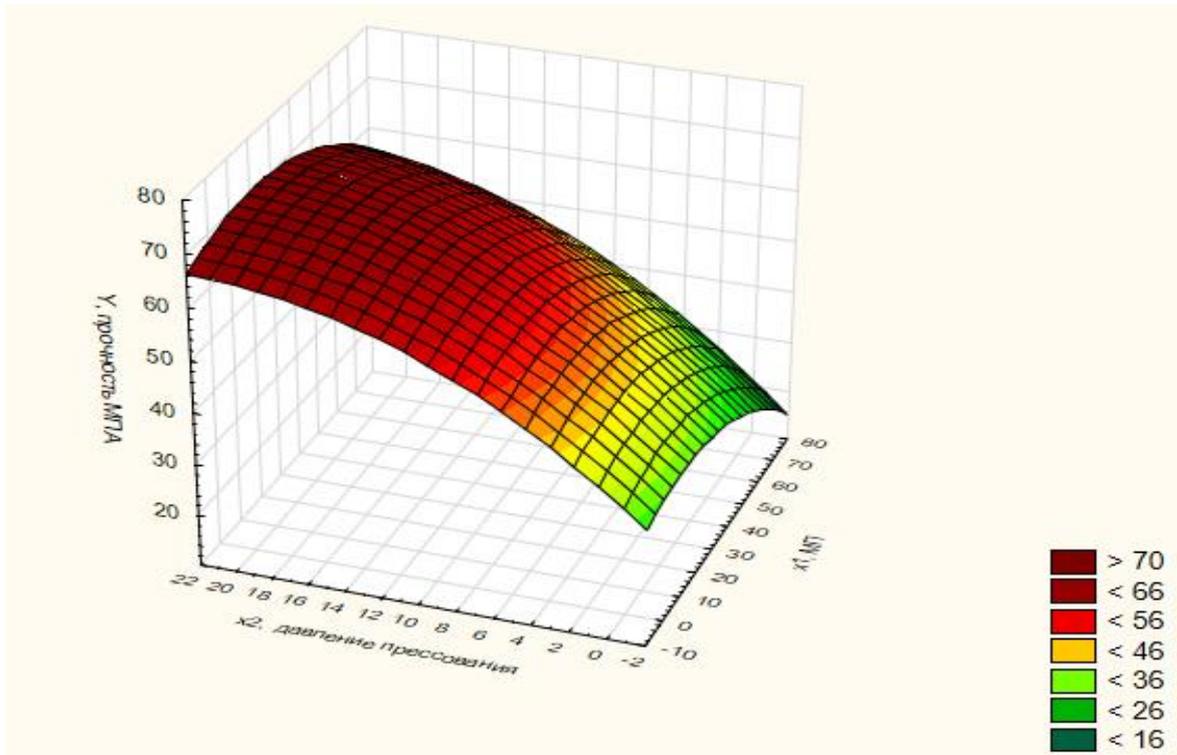


Рисунок 4.2 – Влияние состава смеси ( $X_1$ ) и давления прессования ( $X_2$ ) на прочность при сжатии цементно-песчаного композита после 28 суток н.т. ( $Y$ ).

Результаты определения начального и остаточного В/Т в зависимости от состава смеси и давления прессования представлены в таблице 4.3 и в графической форме на рисунке 4.3.

Таблица 4.3 – Зависимость начального и остаточного В/Т от состава смеси и давления прессования

Соотношение компонентов Ц/МП, % по массе	Начальное водотвердое отношение, В/Т	Остаточное водотвердое отношение, В/Т при давлении прессования, равном			
		5 МПа	10 МПа	15 МПа	20 МПа
100 : 0	0,45	0,31	0,29	0,27	0,26
90 : 10	0,43	0,29	0,27	0,25	0,24
80 : 20	0,41	0,27	0,25	0,23	0,22
70 : 30	0,39	0,26	0,24	0,22	0,21
60 : 40	0,37	0,24	0,22	0,21	0,20
50 : 50	0,35	0,23	0,21	0,20	0,19
40 : 60	0,32	0,22	0,20	0,19	0,18

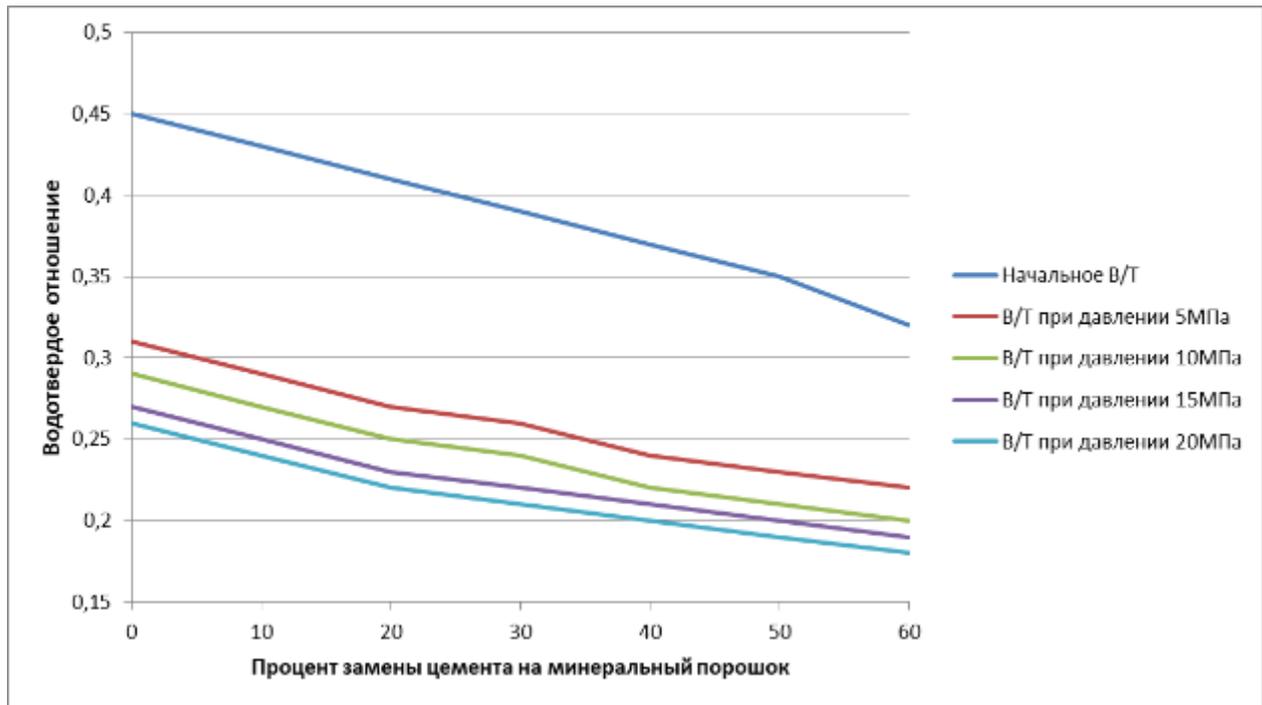


Рисунок 4.3 – Зависимость начального и остаточного В/Т от состава смеси и давления прессования

Как видно из результатов исследований, при замене в составе цементно-песчаной смеси до 40% цемента на тонкомолотый минеральный наполнитель прочность цементно-песчаного композита практически не изменяется, что можно объяснить уменьшением капиллярной пористости за счет снижения начального В/Т с 0,45 до 0,37 при равной подвижности смеси, что связано с меньшей водопотребностью ТМН по сравнению с цементном. Прочность образцов цементно-песчаного композита, полученного по технологии фильтрационного прессования, даже при минимальном давлении значительно выше прочности материала того же состава, полученного по литьевой технологии, что объясняется удалением воздушных пор в процессе фильтрационного прессования и меньшим объемом капиллярной пористости за счет низкого остаточного В/Т цементно-песчаного композита после завершения процесса фильтрационного прессования. Наиболее значительный прирост прочности наблюдается при давлениях прессования до 10-15 МПа, при более высоких давлениях прирост прочности практически прекращается, что хорошо согласуется с литературными данными по

прессованию гипсовых и цементно-карбонатных систем [56, 61]. На основании результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод, что оптимальным с точки зрения обеспечения плотной и прочной структуры цементно-песчаного композита является давление фильтрационного прессования, равное 10-15 МПа, дальнейшее увеличение давления не приводит к значительному приросту прочности материала и является экономически нецелесообразным [137].

Как видно из таблицы 4.3, остаточное водотвердое отношение цементно-песчаного композита после завершения процесса фильтрационного прессования в среднем на 30-40% ниже начального водотвердого отношения на момент затворения системы водой. Исходя из этого, при оценке среднего размера капиллярных пор для цементно-песчаных композитов, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования, в формуле 2.2 предлагается вместо параметра  $w'$  – водотвердое отношение системы, использовать параметр  $w'_{\text{ост}}$  – остаточное водотвердое отношение системы после завершения процесса прессования, в результате чего уравнение примет вид:

$$a_{yf} = \frac{V_{yf}}{S_{yf}} = \frac{n \cdot [w'_{\text{ост}}/c - (\theta_x(\vartheta - 1) + \alpha_v + \alpha_v \theta_x \xi (\vartheta - 1))]}{S_{x0} \gamma_x \{ [1 + \theta_x(\vartheta - 1)]^{2/3} + \beta \cdot \alpha_v [1 + \xi \theta_x(\vartheta - 1)]^{2/3} \}} \quad (4.1)$$

Применение откорректированной формулы 4.1 вместо формулы 2.2 позволит более корректно оценить средней размер капиллярных пор в цементно-песчаных системах, содержащих в составе тонкомолотый минеральный наполнитель и формируемых методом фильтрационного прессования.

#### **4.2 Оценка динамики набора прочности цементно-песчаных композитов, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования**

Как известно, при изготовлении любых штучных строительных изделий (стеновых, кровельных, облицовочных) на цементной основе важнейшей характеристикой мелкозернистого бетона, помимо прочности и

морозостойкости, является динамика набора прочности, которая напрямую влияет на сроки распалубки изделий и возможность их отгрузки потребителю. По данным ряда авторов [78, 82, 90], при введении в состав цементно-песчаной смеси частиц тонкомолотого наполнителя происходит ускорение начальной стадии твердения цементных систем, для которых частицы наполнителя служат центрами кристаллизации. Ускорению набора прочности способствует также применение технологии фильтрационного прессования, при использовании которой в процессе отжима воды происходит сближение частиц твердой фазы (частиц цемента между собой и частиц цемента и тонкомолотого наполнителя), в результате чего происходит интенсификация процесса образования кристаллизационных контактов между частицами твердой фазы и формирование уже на начальном этапе плотной прочной структуры цементного камня [138].

Для подтверждения предложенной гипотезы были проведены экспериментальные исследования, которые заключались в изготовлении и испытании по показателю «прочность при сжатии» образцов-цилиндров, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования (при давлении прессования 15 МПа) и по литевой технологии.

Для дальнейших исследований по получению высокопрочных цементно-песчаных композитов по технологии фильтрационного прессования в качестве исходного состава принят мелкозернистый бетон с соотношением цемент : ТМН : песок = 2 : 1 : 6 (т.е. в исходном составе цемент : песок = 1 : 2 тонкомолотым наполнителем было заменено 35% цемента). Водотвердое отношение (В/Т) подбиралось из условия получения высокоподвижной цементно-песчаной смеси ( $P_k = 270-280\text{мм}$ ) при постоянном расходе поликарбоксилатного суперпластификатора СТС-01 (0,6% от массы цемента + наполнителя) за счет корректировки расхода воды. Изготовленные образцы испытывались по показателю «прочность на сжатие» в возрасте 1, 3, 7 и 28 суток нормального твердения, а также после термовлажностной обработки по режиму: набор температуры – 3 часа, выдерживание при температуре +60°C

– 4 часа, снижение температуры – 3 часа. Для каждого возраста были испытаны по три образца, изготовленных по литьевой технологии, и по три образца, изготовленных по технологии фильтрационного прессования. Результаты испытаний представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты испытаний образцов-цилиндров по показателю «прочность при сжатии».

Предел прочности при сжатии R, МПа				
Образцы, изготовленные по технологии ФП (давление 15 МПа)				
В возрасте 1 суток н.т.	В возрасте 3 суток н.т.	В возрасте 7 суток н.т.	В возрасте 28 суток н.т.	После ТВО по режиму 3+4+3
22,6	35,5	51,2	64,3	52,2
20,9	34,2	49,8	62,2	52,8
22,5	37,4	47,5	61,6	49,2
<b>Ср. 22,0</b> (35% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 35,7</b> (57% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 49,5</b> (79% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 62,7</b> R <sub>28</sub>	<b>Ср. 51,4</b> (82% от R <sub>28</sub> )
Образцы, изготовленные по вибролитьевой технологии				
9,5	17,6	26,6	39,6	27,6
9,9	18,8	24,1	40,8	27,3
9,1	17,6	27,0	39,0	28,8
<b>Ср. 9,5</b> (24% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 18,0</b> (45% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 25,9</b> (65% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 39,8</b> R <sub>28</sub>	<b>Ср. 27,9</b> (70% от R <sub>28</sub> )

Как видно из результатов испытаний, образцы, изготовленные по технологии фильтрационного прессования, характеризуются ускоренным набором прочности по сравнению с образцами, изготовленными по вибролитьевой технологии. Прочность при сжатии для таких образцов в возрасте 3 суток н.т. составляет 57% от 28-суточной (для вибролитьевых образцов – 45%), прочность при сжатии в возрасте 7 суток н.т. составляет 79% от 28-суточной (для вибролитьевых образцов – 65%). При температурно-влажностной обработке прочность образцов составила 82% от 28-суточной (для вибролитьевых образцов – 70%). Ускоренный набор прочности мелкозернистого бетона в ранние сроки позволяет при производстве цементно-песчаной черепицы обеспечить более раннюю выпрессовку (распалубку) изделий и их отгрузку потребителю при достижении отпускной прочности 70% через 1 сутки (после пропаривания) либо через 4-5 суток нормального твердения.

### **4.3 Оценка долговечности цементно-песчаных композитов, изготовленных по технологии фильтрационного прессования**

Исходя из обеспечения требуемого срока эксплуатации кровель из цементно-песчаной черепицы не менее 50 лет, важнейшим требованием к цементно-песчаным изделиям, изготавливаемым по технологии фильтрационного прессования, является их долговечность, т.е. способность объекта сохранять прочностные, физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы.

Для цементно-песчаной черепицы важнейшими параметрами, определяющими ее долговечность, являются:

- сохранение проектной прочности мелкозернистого бетона в течение всего периода эксплуатации изделий (не менее 50 лет);
- стойкость кровельных изделий к внешним воздействиям: ультрафиолетовому излучению, изменению температуры и влажности, попеременному замораживанию и оттаиванию.

Согласно общим представлениям о структурообразовании цементных систем, для цементных бетонов, твердеющих в условиях достаточной влажности, имеет место практически неограниченное во времени нарастание прочности. Долговременная прочность мелкозернистого бетона определяется наличием в его структуре непрогидратировавшего клинкерного фонда, гидратация которого происходит в течение длительного времени и обеспечивает постепенный прирост прочности бетона (при отсутствии процессов деструкции) в течение десятилетий [74]. В частности, согласно [108], прирост прочности бетона в течение первого года эксплуатации конструкций составляет до 30% по отношению к 28-суточному, в дальнейшие три года прирост прочности составляет еще до 20%. Запас непрогидратировавшего клинкерного фонда в возрасте 28 суток нормального твердения, т.е. после набора бетоном проектной прочности, может составлять, в зависимости от исходной тонкости помола цемента, от 40 до 60% [139].

Для оценки количества непрогидратировавшего клинкерного фонда с использованием рентгеновского дифрактометра BRUKER D2 Phaser был выполнен рентгенофазовый анализ двух образцов мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, в возрасте 28 суток нормального твердения, результаты представлены на рисунках 4.4 и 4.5.

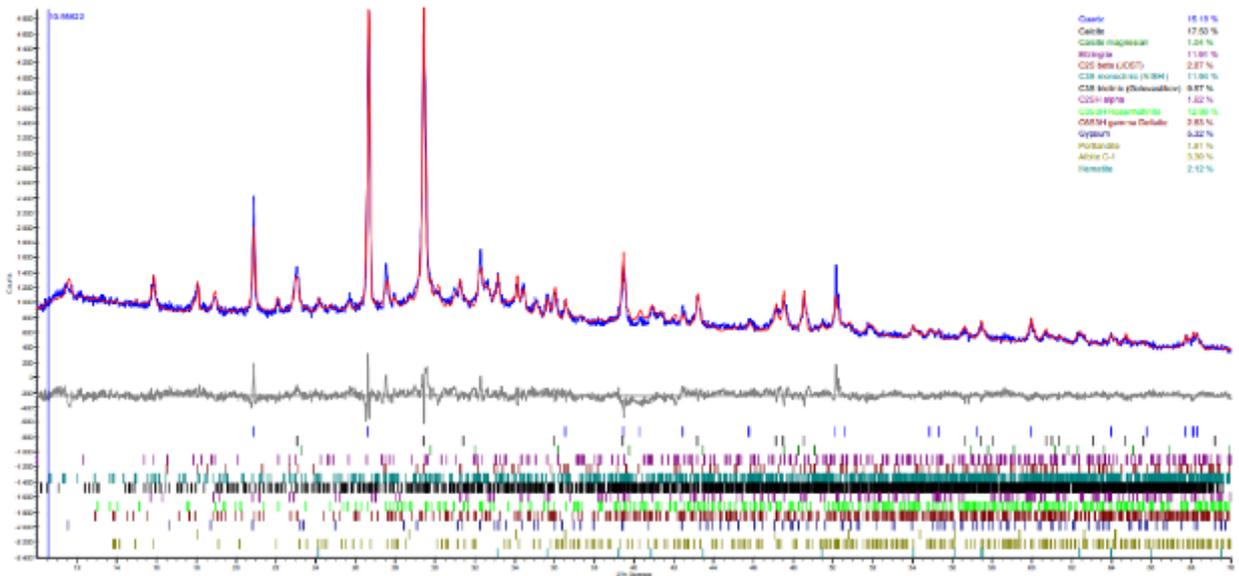


Рисунок 4.4 – Результаты РФА пробы №1 мелкозернистого бетона, изготовленной по технологии фильтрационного прессования, в возрасте 28 суток н.т.

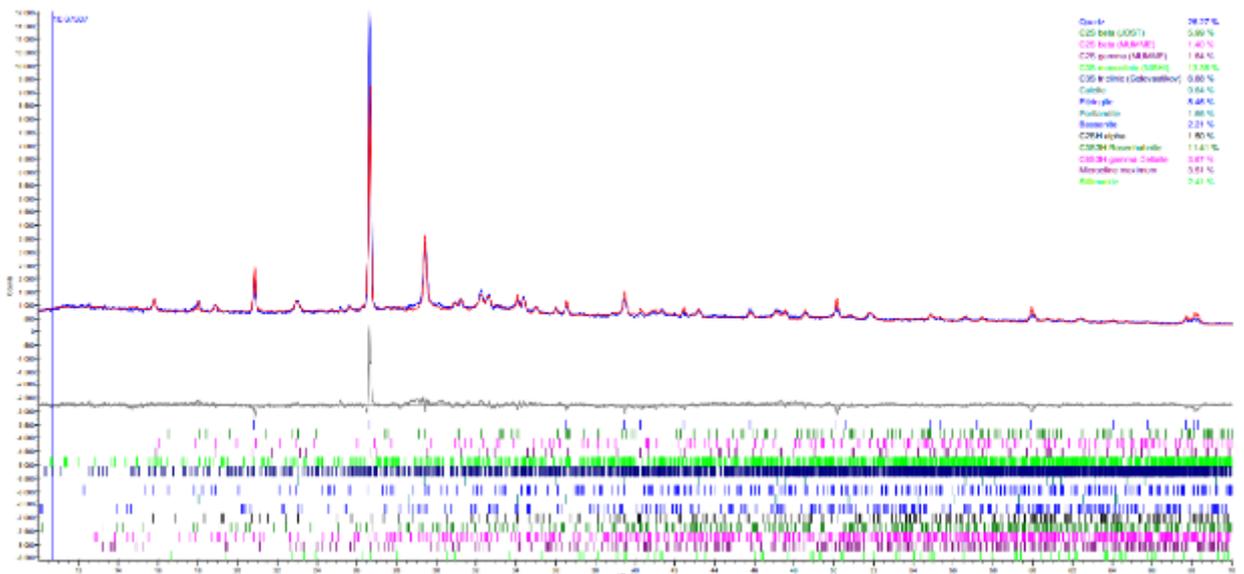


Рисунок 4.5 – Результаты РФА пробы №2 мелкозернистого бетона, изготовленной по технологии фильтрационного прессования, в возрасте 28 суток н.т.

Как видно из результатов РФА, в составе образца №1 мелкозернистого бетона (с заменой 50% цемента на минеральный порошок) присутствуют как минералы цементного камня - гидросиликаты кальция в количестве около 30%, так и исходные минералы цементного клинкера (силикаты кальция) в количестве около 25%. Также присутствует оксид кремния (зерна песка) в количестве 15% и карбонат кальция (минеральный наполнитель) в количестве 18%.

В образце №2 (с заменой 20% цемента на минеральный порошок) содержание минералов цементного камня (гидросиликатов кальция) также составило около 30%, суммарное содержание исходных цементных минералов клинкера – 29%. Содержание кварца (песка) в исследуемой пробе мелкозернистого бетона составило 26%, содержание карбоната кальция (минерального порошка) – 10%.

Из проведенных исследований можно (в первом приближении) сделать вывод, что в образцах мелкозернистого бетона в возрасте 28 суток нормального твердения, несмотря на ускоренный набор прочности, имеется до 50% непрогидратировавшего клинкерного фонда, что позволит за счет его постепенной гидратации в течение продолжительного времени сохранять на прежнем уровне и даже увеличивать прочность мелкозернистого бетона.

Для оценки долговременной прочности мелкозернистого бетона по технологии фильтрационного прессования были изготовлены несколько серий образцов цилиндров для испытания в возрасте 28 суток, 3, 6 и 12 месяцев. Результаты испытаний представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты испытаний образцов-цилиндров, изготовленных по технологии ФП, по показателю «прочность при сжатии».

Предел прочности при сжатии R, МПа			
В возрасте 28 суток н.т.	В возрасте 3 месяцев н.т.	В возрасте 6 месяцев н.т.	В возрасте 12 месяцев н.т.
64,3; 61,5	73,2; 71,6	76,4; 75,3	81,0; 78,4
62,2; 62,9	71,5; 73,8	77,2; 76,2	79,6; 80,3
61,6; 63,6	73,4; 72,5	75,9; 77,1	80,0; 81,2
<b>Ср. 62,7</b> R <sub>28</sub>	<b>Ср. 72,7</b> (115% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 76,5</b> (122% от R <sub>28</sub> )	<b>Ср. 80,2</b> (128% от R <sub>28</sub> )

Как видно из результатов испытаний, прочность образцов мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, в возрасте 3 месяцев составила 115% от 28-суточной, в возрасте 6 месяцев – 121%, в возрасте 12 месяцев – 128%. Таким образом, набор прочности изделий из мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, продолжается в течение продолжительного периода, что позволяет обеспечить долговечность таких изделий.

Стойкость к внешним воздействиям образцов мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, проверялась по следующим показателям:

- атмосферостойкость (испытание в климатической камере).
- морозостойкость – по ГОСТ 10060-2012 [140].

При испытаниях образцов, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, на атмосферостойкость, в связи с отсутствием нормативных документов по оценке данного показателя для бетонов, испытания проводились в климатической камере КВФ 115 (рисунок 4.6) по следующей предложенной автором методике: увлажнение в течение 4 часов – высушивание в течение 4-х часов – увлажнение в течение 4-х часов и т.д., при температуре +30°C.



Рисунок 4.6 - Климатическая камера КВФ 115

По результатам 300 циклов испытаний на попеременное увлажнение-высушивание каких-либо признаков разрушения образцов мелкозернистого бетона не зафиксировано, прочность образцов мелкозернистого бетона после проведения испытаний составила 122% от прочности контрольных образцов.

К морозостойкости цементно-песчаной черепицы действующими нормативными документами предъявляются следующие требования:

- согласно таблице Е.1 ГОСТ 31384-2017 [141] и приложению Ж к СП 28.13330.2017 [142], морозостойкость бетона конструкций, работающих в условиях знакопеременных температур, в условиях эпизодического увлажнения (в частности, надземные конструкции, подвергающиеся атмосферным воздействиям), при расчетной зимней температуре наружного воздуха от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  (условия средней полосы России) должна быть не ниже  $F_{1200}$ ;

- согласно ПНСТ 545-2021 [40], морозостойкость цементно-песчаной черепицы также должна составлять не менее 200 циклов попеременного замораживания-оттаивания.

Испытания образцов мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, проводились по ГОСТ 10060-2012 [140] по первому базовому методу с использованием морозильной камеры КМ-0,19. Замораживание образцов проводилось при температуре минус  $18\pm 2^{\circ}\text{C}$  в течение 4-х часов, оттаивание – в воде при температуре плюс  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  также в течение 4-х часов. Всего замораживанию были подвергнуты 9 образцов, в качестве контрольных были использованы 6 образцов из той же серии. Внешний вид и изменение массы образцов оценивалось через каждые 50 циклов замораживания – оттаивания.

После прохождения образцами 300 циклов попеременного замораживания-оттаивания каких-либо признаков разрушения образцов (шелушения поверхности и т.д.) не зафиксировано, снижение массы образцов составило не более 5%, при этом два образца показали прирост массы в пределах 1,5%. Результаты испытания образцов по показателю прочность при сжатии после 300 циклов замораживания-оттаивания представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты испытаний образцов мелкозернистого бетона при определении их морозостойкости

Предел прочности при сжатии R, МПа		
Контрольные образцы	Основные образцы	Снижение прочности, %
58,7; 59,6; 61,2 57,8; 59,3; 60,4 Ср. 59,5	57,5; 59,9; 56,6 55,8; 60,1; 58,7 58,4; 54,8; 56,0 Ср. 57,4	3,6

Как видно из результатов испытаний, снижение прочности основных образцов по сравнению с контрольными составило 3,6% < 5%, т.е. морозостойкость образцов мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, соответствует марке F<sub>1300</sub>.

Таким образом, учитывая следующие факторы: достаточный запас клинкерного фонда; прирост прочности на сжатие в течение года на 30%; атмосферостойкость не менее 300 циклов попеременного увлажнения-высушивания без снижения массы и прочности; морозостойкость образцов не менее F<sub>1300</sub>, долговечность кровельных изделий из мелкозернистого бетона, изготовленных по технологии фильтрационного прессования, можно оценить в 50 лет и более.

#### **4.4 Исследование цементно-песчаных композитов, полученных по технологии фильтрационного прессования, с применением электронной микроскопии**

Исследование структуры цементно-песчаных композитов, полученных по технологии фильтрационного прессования и (для сравнения) по литевой технологии, выполнялись в Инновационном центре «Лаборатория нанотехнологий цементных систем им. профессоров А.Ф.Полака и Н.Х.Каримова» (ИНОЦ) с применением растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV (с увеличением до 10 000 раз), а также оптического микроскопа с увеличением до 100 раз.

Фотографии структуры цементно-песчаных композитов, полученные на оптическом микроскопе при увеличении в 20 раз, представлены на рисунках 4.7 и 4.8.



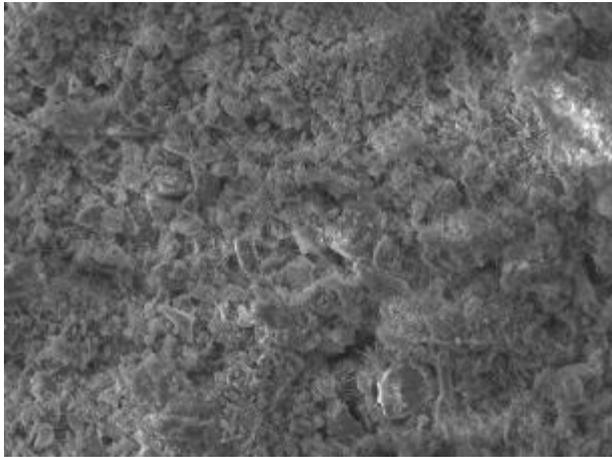
Рисунок 4.7 - Фотографии структуры цементно-песчаных композитов, полученных по технологии ФП (увеличение 20 раз)



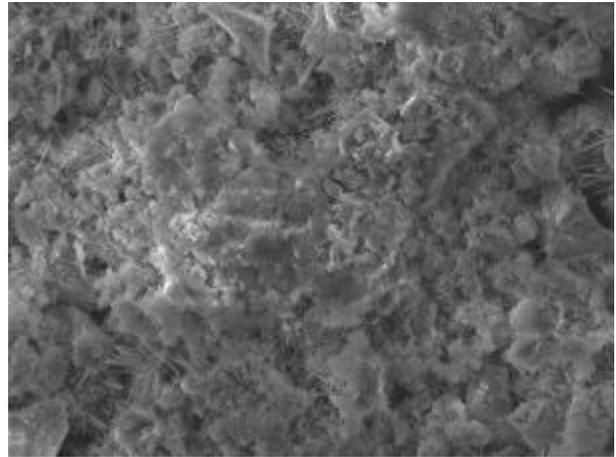
Рисунок 4.8 - Фотография структуры цементно-песчаного композита, полученного по литьевой технологии (увеличение 20 раз)

Как видно из фотографий на рисунке 4.7 и 4.8, образцы, изготовленные по технологии фильтрационного прессования, имеют плотную структуру мелкозернистого бетона без воздушных пор, в то время как образцы из смеси того же состава, изготовленные по вибролитьевой технологии, имеют в своей структуре крупные воздушные поры.

Фотографии структуры цементно-песчаного композита, выполненные на электронном микроскопе при увеличении в 500 и 1000 раз - представлены на рисунках 4.9 и 4.10.

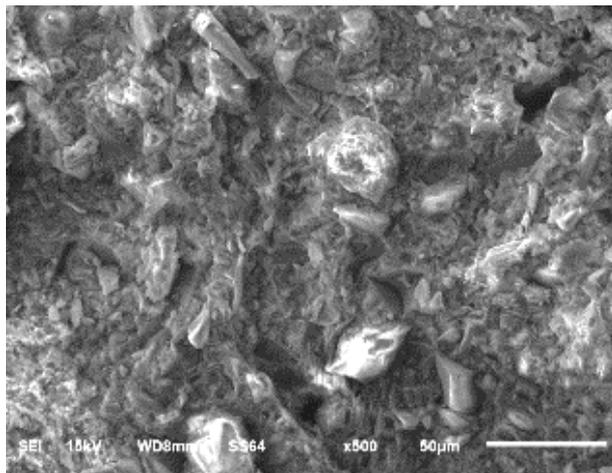


а) – увеличение в 500 раз

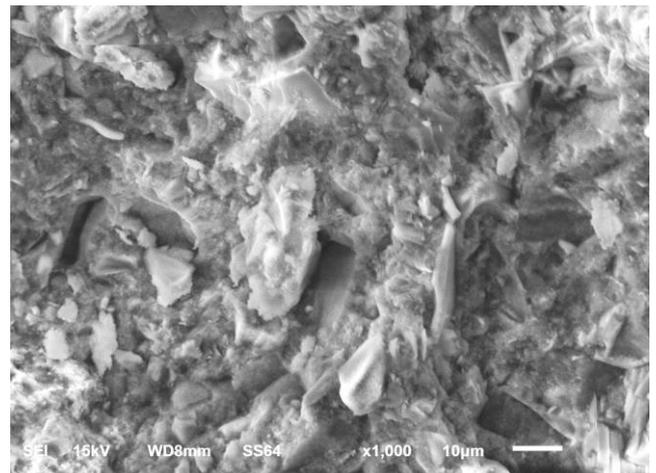


б) – увеличение в 1000 раз

Рисунок 4.9 - Фотографии структуры цементно-песчаных композитов, полученных по технологии ФП (увеличение 500 и 1000 раз)



а) – увеличение в 500 раз



б) – увеличение в 1000 раз

Рисунок 4.10 - Фотографии структуры цементно-песчаных композитов, полученных по технологии ФП (увеличение 500 и 1000 раз)

Как видно из фотографий на рисунках 4.9 и 4.10, выполненных при увеличении 500 и 1000 раз, полученный цементно-песчаный композит имеет однородную структуру, крупные капиллярные поры отсутствуют, что в полной мере подтверждает полученные ранее результаты по высокой плотности и прочности, малому водопоглощению, а также высокой морозостойкости цементно-песчаных композитов (мелкозернистых бетонов), изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования.

#### 4.5 Выводы по четвертой главе

1. При изготовлении цементно-песчаных кровельных и облицовочных изделий по технологии фильтрационного прессования возможна замена в составе сырьевой смеси до 40% цемента на тонкомолотый минеральный наполнитель без снижения их прочности, что можно объяснить уменьшением капиллярной пористости за счет снижения начального В/Т при равной подвижности смеси по причине меньшей водопотребности ТМН по сравнению с цементном.

2. Оптимальным с точки зрения технологичности процесса прессования является давление прессования, равное 10-15 МПа, при продолжительности выдерживания около 180 секунд, что позволяет получить высокие ( $R_b = 50-60$  МПа) прочностные характеристики мелкозернистого бетона.

3. Мелкозернистый бетон изделий, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования, характеризуется ускоренным набором прочности по сравнению мелкозернистым бетоном изделий, изготовленных по вибролитьевой технологии. Ускоренный набор прочности мелкозернистого бетона в ранние сроки позволяет при производстве цементно-песчаной черепицы обеспечить более раннюю выпрессовку (распалубку) изделий и их отгрузку потребителю.

4. Долговечность цементно-песчаных изделий, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования, обеспечивается наличием запаса клинкерного фонда, гидратация которого в течение длительного времени обеспечивает постепенное увеличение прочности мелкозернистого бетона (в течение года – до 30%), а также стойкостью к внешним воздействиям (марка по морозостойкости не менее  $F_1300$ ).

## 5. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ ЧЕРЕПИЦЫ

### 5.1 Нормативные документы, определяющие требования к цементно-песчаной черепице

Действующий государственный стандарт Российской Федерации на цементно-песчаную черепицу в настоящее время отсутствует, однако имеется Предварительный национальный стандарт Российской Федерации ПНСТ 545-2021 [40]. Также при анализе требований, предъявляемых к цементно-песчаной черепице, был рассмотрен отмененный в настоящее время ГОСТ 7487-55 [39], а также ГОСТ Р 56688-2015 [37], регламентирующий требования к керамической черепице.

В соответствии с ГОСТ Р 56688-2015 (приложение Б. таблица Б.1), плоская ленточная черепица должна иметь следующие размеры:

- кроющие (полезные): длина – 160мм, ширина – 155мм;
- габаритные: длина – 365мм, ширина – 155мм;
- количество черепиц на 1м<sup>2</sup> кровли – 40,3 шт.

Масса 1м<sup>2</sup> кровельного покрытия из черепицы в насыщенном водой состоянии должна составлять не более 54 кг, соответственно, масса 1 черепицы в насыщенном водой состоянии должна быть не более 1,34кг.

Разрушающая нагрузка при испытании черепицы на изгиб должна составлять не менее 600Н.

Черепицы должна быть водонепроницаемой. Морозостойкость черепицы должна составлять не менее 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

Согласно ГОСТ Р 56688-2015 [37], к внешнему виду и габаритным размерам керамической черепицы предъявляются следующие требования, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Требования к габаритным размерам и внешнему виду черепицы

№ п/п	Наименование показателя	Нормативные требования	Фактическое значение
1	Внешний вид: - отбитости на кроющей поверхности - отбитости углов и ребер на перекрываемой стороне - наличие трещин	не допускаются  длиной не более 30мм в количестве не более двух не допускается	отсутствуют  отсутствуют отсутствуют
2	Габаритные размеры: - длина, мм; - ширина, мм; - отклонение от прямолинейности ребер (боковых продольных кромок), % - отклонение от плоскостности черепицы, %	365 155  не более 1,5 не более 1,5	365 155  не более 1,0 не более 1,5

Согласно ГОСТ 7487-55 [39], черепица должна быть правильной формы с гладкими поверхностями и ровными краями, без коробления и трещин.

При определении прочности на излом черепицы в воздушно-сухом состоянии величина разрушающего груза должна быть не менее 45 кг в возрасте 28 суток/

Масса 1м<sup>2</sup> покрытия из черепицы в насыщенном водой состоянии должна быть не более 50 кг.

Черепица должна быть водонепроницаема, при испытаниях на нижней поверхности черепицы не должна появляться капля воды раньше, чем через 1 час после начала испытания.

По морозостойкости черепица должна выдерживать без каких-либо признаков разрушения не менее 25 циклов замораживания при температуре минус 15°С и ниже.

Согласно ПНСТ 545-2021 [40], наличие у черепицы внешних дефектов, таких как сколы, расслоения, сквозные трещины, пузыри, раковины не допускается. Предел прочности при изгибе кровельной черепицы должен быть не менее 550 Н. Черепица должна быть водонепроницаемой. Морозостойкость черепицы определяют по ГОСТ 7025-91 [143] методом объемного замораживания. При испытании на морозостойкость цементно-песчаная черепица должна выдерживать 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

При выполнении работы были проведены испытания изготовленных образцов цементно-песчаной черепицы по четырем основным показателям, предусмотренным нормативными документами, которые для удобства представлены в виде таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Нормируемые показатели качества плоской кровельной черепицы

№ п/п	Наименование показателя	ГОСТ Р 56688-2015 (керамическая)	ГОСТ 7487-55 (цементно-песчаная)	ПНСТ 545-2021 (цементно-песчаная)
1	Масса 1м <sup>2</sup> кровельного покрытия из черепицы в насыщенном водой состоянии, кг (масса 1 черепицы в насыщенном водой состоянии, кг)	не более 54 (1,34)	Не более 50 (1,24)	не более 54 (1,34)
2	Водонепроницаемость	Должна быть водонепроницаемой	Должна быть водонепроницаемой	Должна быть водонепроницаемой
3	Разрушающая нагрузка при испытании на изгиб	Не менее 600 Н	Не менее 45 кг	Не менее 550 Н
4	Морозостойкость	Не менее 100 циклов	Не менее 25 циклов	Не менее 200 циклов

Как видно из таблицы 5.2, требования действующего в настоящее время предварительного национального стандарта ПНСТ 545-2021 [40] значительно ужесточились по сравнению с действовавшим ранее ГОСТ 7487-55 [39] (разрушающая нагрузка при испытании на изгиб – с 450Н до 550Н, морозостойкость – с 25 до 200 циклов). Ужесточение нормативных требований затрудняет изготовление цементно-песчаной черепицы по традиционным технологиям (вибропрессование, прокатка, вибропрокатка) и требует внедрения новых технологических решений [138]. В настоящее время предусмотренные ПНСТ 545-2021 [40] требования к цементно-песчаной черепице практически синхронизированы с предусмотренными ГОСТ Р 56688-2015 [37] требованиями к керамической черепице, что предьявляет высокие требования к технологии ее производства.

## **5.2 Изготовление экспериментальных образцов цементно-песчаной черепицы по технологии фильтрационного прессования**

На основании результатов проведенных лабораторных исследований, представленных в разделе 4, автором предложено использование технологии фильтрационного прессования для изготовления цементно-песчаной черепицы, с целью получения изделий, обладающих высокой прочностью и морозостойкостью, и при этом имеющих высококачественную лицевую поверхность.

Предложенная технология была апробирована в лаборатории Научно-образовательного центра инновационных технологий Архитектурно-строительного института УГНТУ. Для изготовления была выбрана плоская ленточная черепица (т.н. «бобровый хвост»), имеющая следующие нормируемые габаритные размеры: длина – 365мм, ширина – 155мм. Толщина черепицы должна быть  $10\pm 2$ мм, высота шипа – не менее 10мм. Для получения экспериментальных образцов черепицы была изготовлена пресс-форма из листового металла. Нижняя часть пресс-формы («матрица») выполнена с идеально гладкой нижней поверхностью из полированного металла, формирующей верхнюю плоскость черепицы, и боковыми стенками (см. рисунок 5.1). Верхняя часть пресс-формы («пуансон») выполнен в виде листа металла с просверленными отверстиями и вертикальными стенками в виде решетки (рисунок 5.2) для передачи нагрузки в процессе прессования. Общий вид формы представлен на рисунке 5.3. Для предотвращения выдавливания цементного раствора при фильтрации влаги в процессе прессования к нижней поверхности пуансона (пластине с отверстиями) закреплялся фильтрующий элемент – тканевый материал, излишки отфильтрованной воды с верхней поверхности пуансона удалялись при помощи фильтровальной бумаги.



Рисунок 5.1 – Нижняя часть пресс-формы (матрица)



а) – вид снизу



б) – вид сверху

Рисунок 5.2 – Верхняя часть пресс-формы (пуансон)



Рисунок 5.3 – Пресс-форма для изготовления цементно-песчаной черепицы в сборе

Разработка рецептуры цементно-песчаной смеси для изготовления экспериментальных образцов черепицы осуществлялась в три этапа. На первом этапе была апробирована одностадийная технология изготовления черепицы путем заливки в форму высокоподвижной (литой) цементно-песчаной смеси следующего состава:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5Н – 25% от массы сухих компонентов;
- минеральный порошок МП-1 – 15% от массы сухих компонентов;
- песок – 60% от массы сухих компонентов;
- вода из условия обеспечения  $V/C = 0,56$  (или  $V/T = 0,35$ );
- суперпластифицирующая добавка «СТС-01» – 0,6% от массы цемента.

Пробные экземпляры черепицы с целью отработки рецептуры смеси и параметров фильтрационного прессования изготавливались без применения красителя. После отработки параметров рецептуры и технологии к базовой рецептуре смеси был добавлен минеральный пигмент-краситель для бетона красного цвета марки «Основит» в количестве 1% от массы сухих компонентов.

Приготовление смеси для изготовления образцов цементно-песчаной черепицы производилось в следующей последовательности. После взвешивания сухие компоненты (цемент, минеральный порошок, песок) (рисунок 5.4) пересыпались в чашу механического смесителя, к ним добавлялись вода, водный раствор суперпластифицирующей добавки и пигмент.



Рисунок 5.4 – Сухие компоненты, приготовленные к перемешиванию

Перемешивание смеси производилось перемешивание в лабораторном смесителе принудительного действия (рисунок 5.5) в течение 90 секунд, определенного опытным путем из обеспечения визуальной однородности смеси.



Рисунок 5.5 – Смеситель лабораторный принудительного для замешивания цементно-песчаной смеси AUTO MORTAR MIXER E093

После перемешивания в механическом смесителе литая растворная смесь выливалась в нижнюю часть формы («матрицу», рисунок 5.6), устанавливался пуансон, для отвода излишков воды укладывалась фильтровальная бумага и производился процесс прессования на лабораторном прессе П-50 мощностью 50 тонн (рисунок 5.7). Давление прессования было определено исходя из ранее проведенных экспериментов (см. главу 4) и составило 10МПа.



Рисунок 5.6 – Высокоподвижная растворная смесь в нижней части формы (матрице)



Рисунок 5.7 –Процесс фильтрационного прессования (начальный этап)

Усилие прессования прикладывалось постепенно со скоростью около 25 КПа в секунду, общее время увеличения нагрузки составило порядка 200 секунд. После достижения давления прессования, равного 10МПа, происходила выдержка образцов при постоянном давлении в течение 180 секунд, до прекращения выделения воды. Далее происходил сброс давления, пресс-форма снималась с пресса и пуансон извлекался из матрицы. Распалубливание изделий производилось через 2 часа после завершения прессования, далее образцы помещались для выдерживания в камеру нормального твердения.

Всего в процессе проведения экспериментов по подбору оптимального расхода воды, расхода красителя, отработке режима прессования и времени выдерживания изделий, определению необходимого расхода материала на изделие, достижению качества лицевой поверхности изделий были изготовлены порядка 15 цементно-песчаных черепиц (рисунок 5.8). Результаты замеров толщины и веса всех изготовленных черепиц представлены в таблице 5.3.



Рисунок 5.8 – Пробные образцы цементно-песчаной черепицы, изготовленные при отработке состава смеси и технологии прессования

Таблица 5.3 - Геометрические размеры и вес пробных образцов цементно-песчаной черепицы

№ изделия	Толщина изделия, мм	Масса изделия, г.	Соответствие требованиям НД по толщине изделия	Соответствие требованиям НД по массе изделия
1	14	1680	Не соответствует	Не соответствует
2	14	1667	Не соответствует	Не соответствует
3	14	1642	Не соответствует	Не соответствует
4	12	1489	Соответствует	Не соответствует
5	15	1810	Не соответствует	Не соответствует
6	16	1929	Не соответствует	Не соответствует
7	13	1629	Не соответствует	Не соответствует
8	13	1612	Не соответствует	Не соответствует
9	7	830	Не соответствует	Соответствует
10	13	1604	Не соответствует	Не соответствует
11	12	1433	Соответствует	Не соответствует
12	11	1363	Соответствует	Не соответствует
13	11	1330	Соответствует	Соответствует
14	9	1036	Соответствует	Соответствует
15	10	1212	Соответствует	Соответствует
16	11	1320	Соответствует	Соответствует
17	11	1305	Соответствует	Соответствует
18	11	1338	Соответствует	Соответствует

По результатам изготовления пробных образцов черепицы установлено, что для соблюдения требований нормативных документов по максимально допустимой массе изделия (не более 1,3 кг), толщина изделий не должна превышать 11 мм. В целом, с применением технологии фильтрационного

прессования были получены образцы плоской ленточной объемно-окрашенной цементно-песчаной черепицы с идеально гладкой лицевой поверхностью (рисунок 5.9), однако испытание черепицы на изгиб по методике ГОСТ Р 56688-2015 [37] с использованием гидравлического пресса ИП-100 (рисунок 5.10) показало, что среднее значение разрушающей нагрузки составляет 500 Н, что не соответствует требованиям ПНСТ 545-2021 [40]. При увеличении толщины черепицы до 12-13 мм разрушающая нагрузка на изгиб увеличивается до 600-800 Н, но при это масса черепицы становится больше допустимой.



Рисунок 5.9 – Качество верхней (лицевой) поверхности цементно-песчаной черепицы, изготовленной по технологии фильтрационного прессования



Рисунок 5.10 – Испытание цементно-песчаной черепицы на изгиб

На втором этапе к разработанной рецептуре цементно-песчаного раствора была добавлена базальтовая фибра (рисунок 5.11) в количестве 5г/л растворной смеси. Разрушающая нагрузка при изгибе для черепицы, изготовленной с добавлением базальтовой фибры, при толщине 11 мм возросла до 770 Н (т.е. на 50%), при этом изменился характер разрушения, при приложении нагрузки сначала происходит образование трещин в растянутой зоне, а затем происходит полное разрушение образца изделия (рисунок 5.12). С точки зрения технологии изготовления изделий добавление базальтовой фибры не создано каких-либо сложностей с перемешиванием растворной смеси, однако привело к существенному снижению качества поверхности изделий (рисунок 5.13). Ухудшение качества лицевой поверхности изделий может быть связано с повышенным воздухововлечением растворной смеси при добавлении в ее состав фиброволокна, а также сложностью полного отжатия пузырьков воздуха из насыщенной волокнами дисперсного армирования растворной смеси.



Рисунок 5.11 – Базальтовая фибра, используемая в экспериментах



Рисунок 5.12 – Фрагмент образца черепицы с фиброй перед разрушением

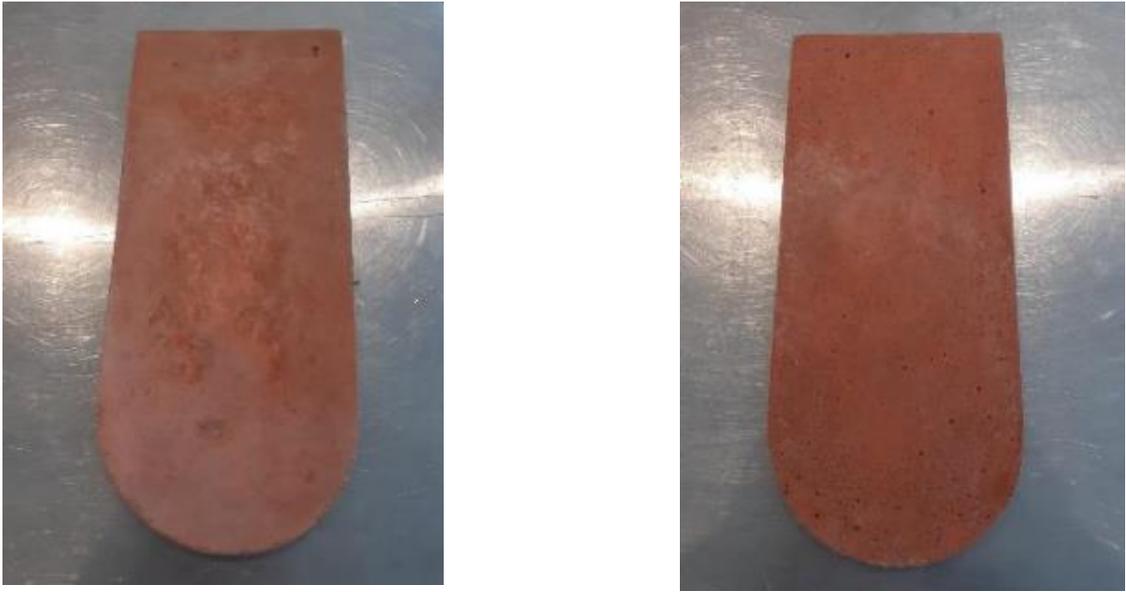


Рисунок 5.13 – Образцы цементно-песчаной черепицы, изготовленные с добавкой базальтовой фибры

С учетом результатов проведенных экспериментальных исследований, автором предложена одностадийная технология изготовления цементно-песчаной черепицы с высокой прочностью и непроницаемостью, а также гладкой лицевой поверхностью методом фильтрационного прессования, заключающаяся в раздельно-последовательной подаче в форму сырьевой смеси двух разных составов. Сначала в форму подается высокоподвижная цементно-песчаная смесь с минеральным наполнителем, суперпластификатором и пигментом, предназначенная для формирования лицевой части изделия, затем подается фиброармированная пластифицированная цементно-песчаная смесь с минеральным наполнителем, предназначенная для формирования остального объема изделия, на завершающем этапе производится фильтрационное прессование изделия.

Предложенная технология позволяет получить высокое качество лицевой поверхности черепицы (рисунок 5.14) и одновременно обеспечить высокие прочностные и эксплуатационные характеристики изделий, для подтверждения которых были проведены испытания изготовленных образцов объемно-окрашенной цементно-песчаной черепицы на соответствие требованиям нормативных документов, представленных в таблице 5.2.



Рисунок 5.14 – Верхняя (лицевая) и нижняя поверхности цементно-песчаной черепицы, изготовленной по технологии фильтрационного прессования с раздельно-последовательной подачей смеси

### **5.3 Результаты испытаний экспериментальных образцов цементно-песчаной черепицы**

При выполнении работы по предложенной технологии фильтрационного прессования с раздельно-последовательной подачей в форму сырьевой смеси была изготовлена опытная партия из 40 образцов цементно-песчаной черепицы, которые были испытаны в аттестованной лаборатории Научно-образовательного центра инновационных технологий Архитектурно-строительного института УГНТУ (НОЦИТ АСИ УГНТУ) на соответствие требованиям нормативных документов: ПНСТ 545-2021 [40] и (для сравнения с керамической черепицей) ГОСТ Р 56688-2015 [37]. Результаты испытаний оформлены в виде акта испытаний и протоколов испытаний, представленных в Приложении В.

Результаты испытаний по показателю «разрушающая нагрузка при изгибе» серии из 10 образцов цементно-песчаной черепицы, изготовленных по технологии фильтрационного прессования с раздельно-последовательной подачей смеси, представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты испытаний образцов цементно-песчаной черепицы по показателю «разрушающая нагрузка при изгибе».

№ изделия	Толщина изделия, мм	Масса изделия, г.	Соответств. требованиям НД по массе изделия	Разрушающая нагрузка при изгибе, Н
3-1	11	1340	Соответствует	740
3-2	11	1320	Соответствует	770
3-3	11	1299	Соответствует	700
3-4	11	1335	Соответствует	820
3-5	11	1331	Соответствует	750
3-6	11	1344	Соответствует	850
3-7	11	1315	Соответствует	680
3-8	11	1326	Соответствует	720
3-9	11	1309	Соответствует	790
3-10	11	1318	Соответствует	650
Среднее значение		1323		720

Коэффициент вариации прочности изделий был определен в соответствии с ГОСТ 18105-2018 [144] по формуле

$$v_m = \frac{S_m}{R_m} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

где  $S_m$  – среднеквадратичное отклонение прочности изделий в партии бетона;  
 $R_m$  – фактическая прочность изделий в партии.

При фактической прочности изделий в партии, равной 720 Н, что в полной мере соответствует требованиям как для цементно-песчаной черепицы согласно ПНСТ 545-2021 (не менее 550 Н), так и для керамической черепицы согласно ГОСТ Р 56688-2015 (не менее 600 Н), при этом коэффициент вариации составил 8,5%, что также соответствует требованиям ГОСТ 18105-2018 [144] (не менее 16%).

Водонепроницаемость черепицы определялась путем установки на верхнюю поверхность черепицы стального кольца, заполнения кольца водой на высоту 100мм (рисунки 5.15 и 5.16) и выдерживания в течение 48 часов с фиксацией наличия либо отсутствия на нижней поверхности черепицы мокрого пятна. На водонепроницаемость по методу мокрого пятна были испытаны три черепицы, во всех трех испытаниях через 48 часов протечек влаги (появления капли воды) и увлажнения нижней поверхности изделия (появления мокрого пятна) не зафиксировано, водонепроницаемость изделий обеспечивается.



Рисунок 5.15 – Установка кольца на образец черепицы и заполнение его водой



Рисунок 5.16 – Испытание цементно-песчаной черепицы на водонепроницаемость



Рисунок 5.17 – Результат испытания черепицы на водонепроницаемость (через 48 часов после начала испытаний протечки воды и увлажнение нижней поверхности черепицы отсутствовали)

Помимо метода мокрого пятна, были проведены испытания трех образцов цементно-песчаной черепицы (№11, №12 и №13) по стандартной для бетонов методике косвенным методом по воздухопроницанию по ГОСТ 12730.5-2018 [145] с использованием прибора ВВ-2 (рисунок 5.18). По результатам испытания установлено, что водонепроницаемость мелкозернистого бетона всех испытанных образцов соответствует марке W6.

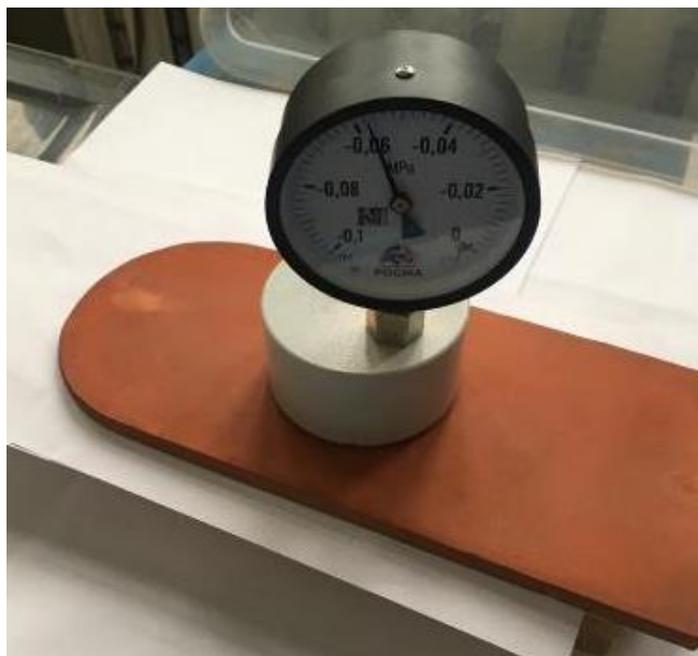


Рисунок 5.18 – Испытание образцов черепицы на водонепроницаемость косвенным методом с помощью прибора ВВ-2

Испытание образцов цементно-песчаной черепицы на морозостойкость в соответствии с ГОСТ 10060-2012 [140] по первому базовому методу с учетом требований ПНСТ 545-2021 [40] показало, что изделия выдержали без каких-либо признаков разрушения 300 циклов попеременного замораживания-оттаивания, что соответствует превышает требования действующих нормативных документов (не менее 200 циклов).

После испытания по показателю «разрушающая нагрузка при изгибе» разрушенные фрагменты цементно-песчаной черепицы были исследованы с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV при увеличении 60 и 100 раз, полученные фотографии представлены на рисунках 5.19 и 5.20.

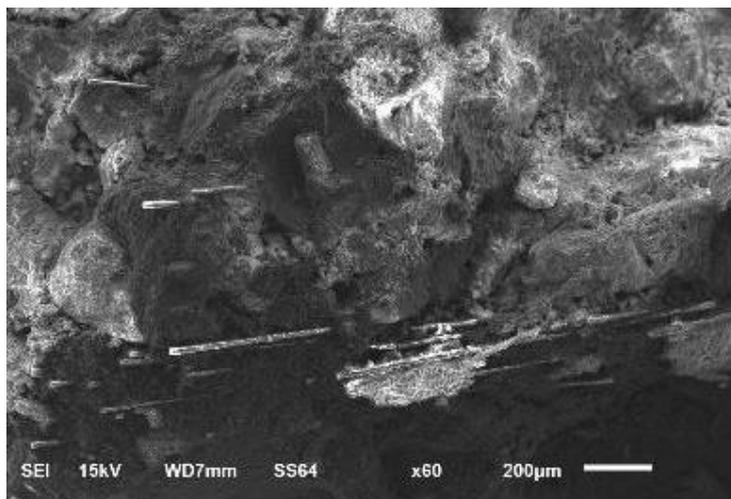


Рисунок 5.19 – Фотография фиброармированного цементно-песчаного композита, полученного по технологии ФП, при увеличении в 60 раз

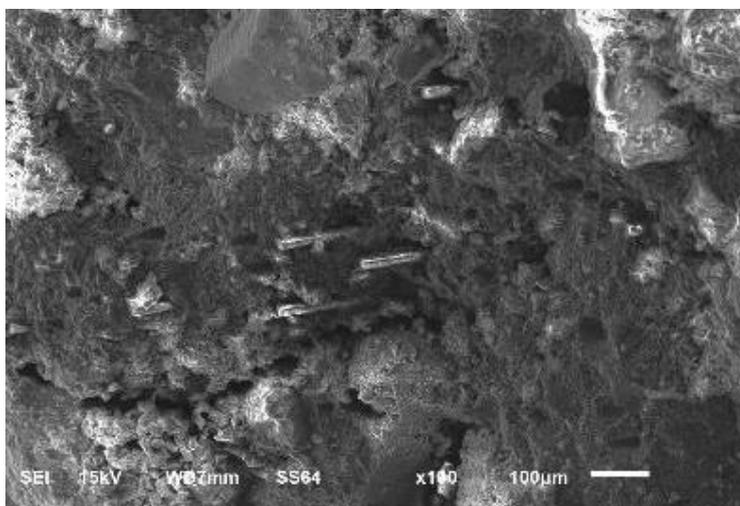


Рисунок 5.20 – Фотография фиброармированного цементно-песчаного композита, полученного по технологии ФП, при увеличении в 100 раз

На выполненных фотографиях видно, что волокна базальтовой фибры в цементно-песчаных композитах, получаемых по технологии фильтрационного прессования, располагаются не хаотично, как при вибролитьевой технологии, а преимущественно в направлениях, перпендикулярных оси приложения прессующего давления. Такое расположение волокон базальтовой фибры позволяет значительно повысить прочность фиброармированного мелкозернистого бетона на растяжение при изгибе (по сравнению с неармированным), что и было подтверждено ранее проведенными экспериментальными исследованиями.

В целом, как видно из результатов испытаний, образцы цементно-песчаной черепицы, изготовленные по технологии фильтрационного прессования с отдельно-последовательной подачей смеси в форму, соответствуют требованиям нормативной документации по показателям «разрушающая нагрузка при изгибе», «водонепроницаемость» и «морозостойкость» как для цементно-песчаной, так и для керамической черепицы, имеют высокое качество лицевой поверхности, но при этом за счет отсутствия энергоемкого процесса обжига при производстве изделий значительно дешевле керамической черепицы.

#### **5.4 Технологическая схема производства цементно-песчаной черепицы по методу фильтрационного прессования**

Принципиальная технологическая схема производства цементно-песчаной черепицы по технологии фильтрационного прессования с отдельно-последовательной подачей смеси в форму, разработанная соискателем на основании результатов проведенных исследований, представлена на рисунке 5.21. Технологическая схема предусматривает применение как стандартного оборудования предприятий по производству строительных материалов и изделий (бункеры, дозаторы, питатели, смесители), так и специфическое для данной технологии оборудование – гидравлические прессы (мощностью 100 тонн) и пресс-формы, а также расходные материалы – фильтрационные картон и смазки для форм.

Технологический процесс производства цементно-песчаной черепицы по технологии фильтрационного прессования состоит из следующих основных этапов:

- доставка и складирование сырьевых материалов (портландцемент, минеральный порошок, сеяный песок, суперпластификатор, краситель) в герметичных расходных бункерах;
- подготовка пресс форм, их очистка и смазывание;
- дозирование всех исходных компонентов смеси с использованием автоматизированных весовых или объемных дозаторов;

- подача исходных материалов в смесители;
- смешивание исходных материалов и приготовление растворной смеси в двух смесителях принудительного действия: в одном смесителе – цементно-песчаная смесь с суперпластификатором и минеральным наполнителем (без фибры) для лицевой поверхности изделия, во втором смесителе – фиброармированная цементно-песчаная смесь также с суперпластификатором и минеральным наполнителем;
- заливка цементно-песчаной смеси в форму: сначала из смесителя №1, затем из смесителя №2. Разравнивание и разглаживание смеси отдельно не производятся;
- фильтрационное прессование изделий при давлении 10-15 МПа в течение 2,5 – 3 минут, в процессе которого из смеси удаляется избыток воды затворения через комбинированный многослойный фильтрующий элемент, состоящий из фильтрующего основания в виде металлической сетки и сменного фильтрующего материала (фильтровальный картон, бумага, ткань). Образовавшийся фильтрат (отфильтрованную жидкость) можно использовать для повторного применения в качестве воды затворения;
- извлечение изделий из пресс-формы и укладка изделий на поддонах в кассетный накопитель;
- пропаривание изделий в пропарочной камере;
- укладка изделий в вертикальном положении в контейнеры для транспортировки.

Процесс формования цементно-песчаной черепицы по технологии фильтрационного прессования является периодическим. Наиболее рациональной, на наш взгляд, является конвейерно-карусельная схема прессования, при которой формы на замкнутом поворотном конвейере перемещаются в горизонтальном направлении между постами подачи смеси, прессом, и зоной выпрессовки, после которой черепица по другой конвейерной линии подается на поддонах в кассетный накопитель для дальнейшего перемещения в пропарочную камеру.

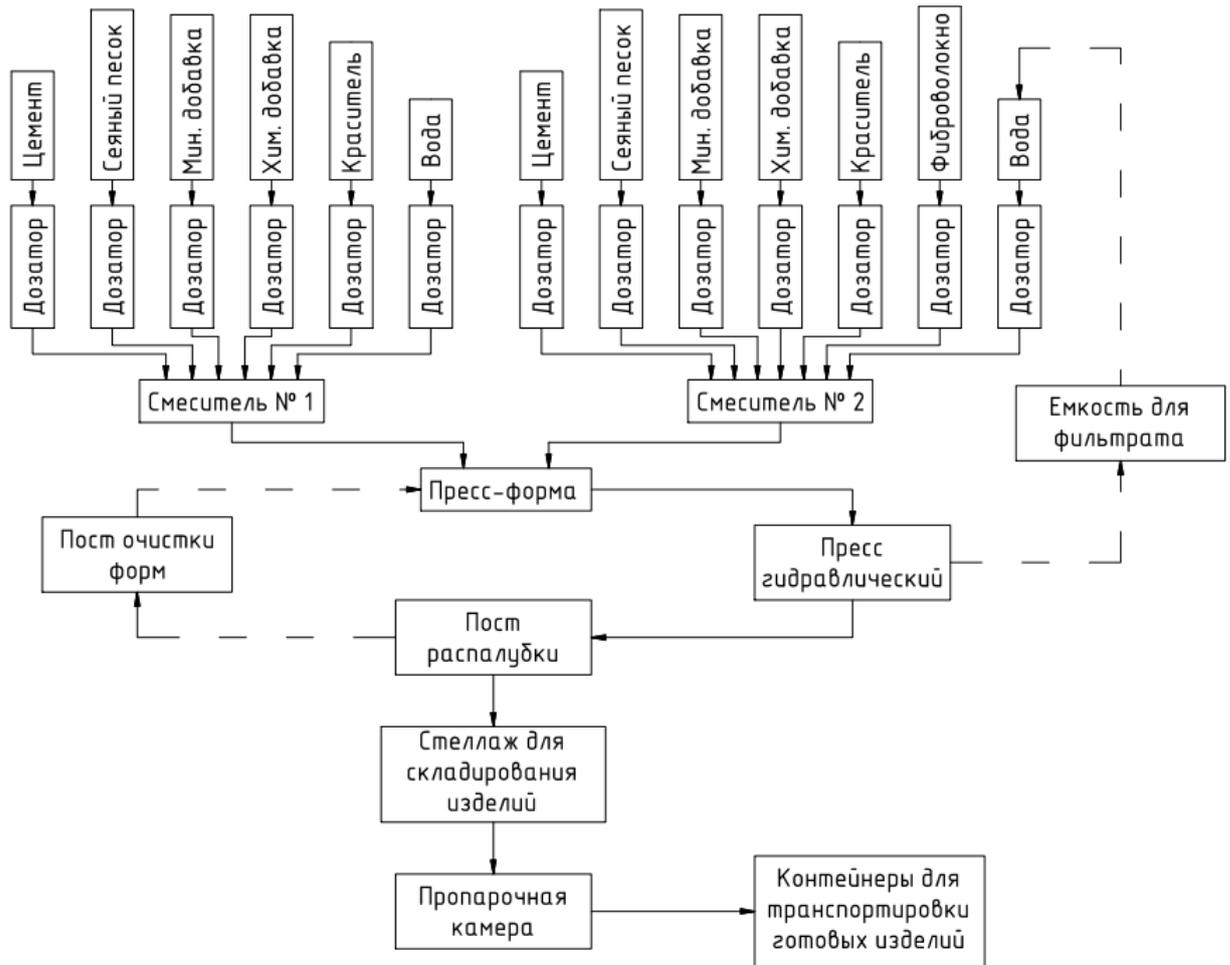


Рисунок 5.21 - Принципиальная технологическая схема изготовления цементно-песчаной черепицы по технологии фильтрационного прессования с раздельно-последовательной подачей смеси в форму.

На цементно-песчаную черепицу были разработаны ТУ 23.61.11-027-02069450-2024 «Черепица цементно-песчаная плоская ленточная, изготавливаемая по технологии фильтрационного прессования. Технические условия», скан-копия которых представлена в Приложении Б.

Также по результатам исследований была разработана программа и получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц» №2020663812 от 02 ноября 2020г. (скан-копия представлена в Приложении А). Программа предназначена для автоматизации расчета удельной поверхности сырьевой смеси и среднего размера частиц в зависимости от воздухопроницаемости слоя порошкообразного материала, толщины слоя

материала и удельного веса материала. Программа предназначена для применения в исследовательских и производственных целях, а также в лабораториях заводов по производству строительных материалов.

### **5.5 Выводы по пятой главе**

1. Предложена одностадийная технология изготовления цементно-песчаной черепицы методом фильтрационного прессования, заключающаяся в раздельно-последовательной подаче в форму сырьевой смеси двух разных составов. Сначала в форму подается высокоподвижная цементно-песчаная смесь с минеральным наполнителем, суперпластификатором и пигментом, предназначенная для формирования лицевой части изделия, затем подается фиброармированная пластифицированная цементно-песчаная смесь с минеральным наполнителем, предназначенная для формирования остального объема изделия, на завершающем этапе производится фильтрационное прессование изделия.

2. По предложенной технологии фильтрационного прессования с раздельно-последовательной подачей сырьевой смеси в форму была изготовлена опытная партия цементно-песчаной черепицы. Результаты испытаний в аттестованной лаборатории Научно-образовательного центра инновационных технологий Архитектурно-строительного института УГНТУ показали, что все испытанные образцы цементно-песчаной черепицы соответствуют требованиям нормативной документации по показателям «разрушающая нагрузка при изгибе», «водонепроницаемость» и «морозостойкость» как для цементно-песчаной, так и для керамической черепицы.

3. Предложенная технология фильтрационного прессования с раздельно-последовательной подачей смеси в форму позволяет изготавливать цементно-песчаную черепицу высокой прочности, водонепроницаемости и морозостойкости, с высоким качеством лицевой поверхности, но при этом за счет отсутствия энергоемких производственных процессов выпускаемые изделия будут значительно дешевле керамической черепицы, что позволяет снизить удельные капитальные вложения и энергетические затраты, и тем самым повысить общую технико-экономическую эффективность производства цементно-песчаной черепицы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность изготовления высокопрочных и долговечных изделий из мелкозернистого бетона методом фильтрационного прессования высокоподвижных цементно-песчаных смесей с одновременным отводом отфильтрованной избыточной воды. Показано, что в процессе фильтрационного прессования уже при умеренных давлениях 10...15 МПа достигается остаточное водотвердое отношение, равное 0,2 – 0,25, при этом происходит значительное уплотнение бетонной смеси и уменьшение объема воздушных и капиллярных пор. Также показано, что давление прессования положительно влияет на кинетику гидратации и структурообразования бетона за счет сближения гидратирующих частиц цемента и активного формирования контактов между ними, что позволяет обеспечить ускоренный набор прочности.

2. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что значительному повышению прочностных характеристик (на 50% и более) цементно-песчаных систем за счет снижения их пористости при использовании технологии фильтрационного прессования способствует введение в цементно-песчаную смесь тонкомолотых минеральных наполнителей на основе карбонатных пород или отходов химической промышленности в сочетании с суперпластифицирующими добавками.

3. Установлено, что основными факторами, определяющими процессы структурообразования в условиях фильтрационного прессования пластичных цементно-песчаных смесей и свойства получаемых цементно-песчаных композитов, являются подвижность цементно-песчаной смеси, исходное и остаточное водотвердое отношение, дисперсность заполнителей и наполнителей, а также величина прессующего давления. Показано, что для изготовления по технологии фильтрационного прессования цементно-песчаных кровельных изделий с качественной лицевой поверхностью наилучшим образом подходят высокоподвижные цементно-песчаные смеси (расплыв конуса  $R_k=270-280\text{мм}$ ) с заменой тонкомолотым минеральным наполнителем 30-40%

цемента, имеющие при этом низкое исходное водотвердое отношение ( $V/T \approx 0,35$ ) за счет применения высококачественных суперпластифицирующих добавок.

4. Установлено, что оптимальным с точки зрения технологичности процесса прессования является давление прессования, равное 10-15 МПа, при продолжительности выдерживания около 180 секунд, что позволяет получить высокие ( $R_b = 50-60$  МПа) прочностные характеристики мелкозернистого бетона. Долговечность цементно-песчаных изделий, изготавливаемых по технологии фильтрационного прессования, обеспечивается наличием запаса клинкерного фонда, гидратация которого в течение длительного времени обеспечивает постепенное увеличение прочности мелкозернистого бетона (в течение года – до 30%), а также стойкостью к внешним воздействиям (марка по морозостойкости не менее  $F_1300$ ).

5. Предложена одностадийная технология изготовления цементно-песчаной черепицы методом фильтрационного прессования с последовательной подачей в форму сырьевой смеси двух разных составов: высокоподвижной цементно-песчаная смеси с тонкомолотым минеральным наполнителем и суперпластификатором для формирования лицевой части изделия, и фиброармированной пластифицированной цементно-песчаной смеси с тонкомолотым минеральным наполнителем для формирования остального объема изделия. Предложенная технология позволяет изготавливать цементно-песчаную черепицу с высоким качеством лицевой поверхности и одновременно обеспечить высокие прочностные и эксплуатационные характеристики изделий, которые соответствуют требованиям нормативной документации как для цементно-песчаной, так и для керамической черепицы, при этом, за счет отсутствия энергоемких процессов обжига, технико-экономическая эффективность производства будет значительно выше по сравнению с традиционными технологиями производства черепицы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шерешевский И.А. Конструирование гражданский зданий. /И.А.Шерешевский. – М.: Архитектура-С, 2007. – 176 с.
2. Вильчик, Н.П. Архитектура зданий: Учебник. / Н.П.Шерешевский. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 303 с.
3. Алейникова, В. В. Обзор существующих кровельных покрытий скатных крыш в малоэтажном жилом домостроении / В. В. Алейникова, Р. Н. Зорин // Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты : сборник статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Том Выпуск 10. – Пермь: ИП Сигитов Т.М., 2016. – С. 11-13.
4. Белевич, В. Б. Кровельные работы. / В. Б. Белевич. - Москва: Высшая школа, 2007. — 208 с.
5. Ильин, А. В. Особенности устройства скатной крыши для малоэтажного жилого здания / А. В. Ильин // IV Международный студенческий строительный форум - 2019: Сборник докладов (К 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова). В 2-х томах, Белгород, 26 ноября 2019 года. Том 1. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 55-61.
6. ГОСТ 30340-95. Листы асбестоцементные волнистые. Технические условия. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9056062> (дата обращения 10.01.2024).
7. ГОСТ 18124-95. Листы асбестоцементные плоские. Технические условия. [Электронный ресурс]. – URL:<https://docs.cntd.ru/document/901710673> (дата обращения 10.01.2024).
8. Асбестоцементные листы. Применение в строительстве. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://monolit-td.ru/blog/poleznye-stati/asbestotsementnye-listy-primeneniye-v-stroitelstve/> (дата обращения 10.01.2024).
9. Горчаков, Г.И. Строительные материалы: Учебник для ВУЗов. / Г.И.Горчаков, Ю.М.Баженов. – М.: Стройиздат, 1986. – 688с.
10. Листы асбестоцементные. Виды и применение. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://cem-cement.ru/stati/listy-asbestocementnye-vidy-primeneniye/> (дата обращения 10.01.2024).

11. Наумова Л.Н., Повышение качества асбестоцементных изделий на основе модифицированного хризотила. / Л.Н. Наумова, А.И.Везенцев, В.И.Павленко, С.М.Нейман.– Белгород: БГТУ, 2009. – 135 с.

12. Металлочерепица: все что Вы хотели узнать. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://krovlyaforever.ru/metallprofil/metallocherepitsa-vse-chto-vy-khoteli-uznat/> (дата обращения 11.01.2024).

13. Бузало, Н.А. Крыши и кровли гражданских и производственных зданий. / Н.А.Бузало, И.Д.Платонова, Н.Г.Царитова. – М.: Инфра-М, 2016. – 160 с.

14. Бондаренко, И.Н. Современные кровельные материалы и конструкции кровель, используемые для жилых и промышленных зданий. / И.Н.Бондаренко, С.М. Нейман, С.В. Созинов // Вестник МГСУ. - 2010. - №4-5. - С.31-37.

15. Акимов, С. Ф. Повышение эффективности устройства скатных кровель для малоэтажного строительства / С. Ф. Акимов, С. Б. Эльмурзаев // Инновационное развитие строительства и архитектуры: взгляд в будущее : сборник тезисов участников Международного студенческого строительного форума – 2022, Симферополь, 17–19 ноября 2022 года. – Симферополь: ООО «Издательство Типография «Ариал», 2022. – С. 153-158.

16. Порываев И.А., Калошина С.В. Современные рулонные гидроизоляционные кровельные материалы. / И.А. Порываев, С.В. Калошина // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. - 2018. - Т.2. - С.124-130.

17. Шульженко, Ю.П. Мягкие кровли: проблемы надежности и долговечности / Ю.П.Шульженко // Кровельные и изоляционные материалы. - 2015. – №5. – С.23-27.

18. Гибкая битумная черепица SHINGLAS. [Электронный ресурс] Адрес доступа: [https://www.tn.ru/catalogue/bch\\_shinglas/](https://www.tn.ru/catalogue/bch_shinglas/) (дата обращения 13.01.2024)

19. Современные кровельные покрытия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: [https://www.tn.ru/library/poleznaja\\_informacija/sovremennye-krovelnye-pokrytiya/](https://www.tn.ru/library/poleznaja_informacija/sovremennye-krovelnye-pokrytiya/) (дата обращения 13.01.2024)

20. Кровельный битумный волнистый лист и его характеристики. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://certainteed.by/articles/krovelnyj-bitumnyj-volnistyj-list-i-ego> (дата обращения 13.01.2024)

21. Композитная черепица – современное решение для современной кровли [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://metallprofil.ru/shop/informatsiya/press-tsentr/stati/kompozitnaya-cherepitsa-sovremennoe-reshenie-dlya-sovremennoy-krovli/> (дата обращения 13.01.2024).

22. Композитная черепица: особенности, преимущества. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.grandline.ru/shop/krovlya/kompozitnaya-cherepica/> (дата обращения 13.01.2024).

23. Котляр, В.Д. Основные тенденции и перспективные виды сырья при производстве керамической черепицы. / В.Д.Котляр, К.А.Лапунова, Я.В.Лазарева, И.М.Усепян // Строительные материалы. – 2015. - №12. – С. 28-31.

24. Преимущества керамической черепицы как кровельного материала. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.redroofs.ru/information/articles/preimushchestva-keramicheskoy-cherepitsy-kak-krovelnogo-materiala/> (дата обращения 15.01.2024).

25. Керамическая черепица: виды, свойства, особенности укладки. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://st-par.ru/info/stati-o-krovle/keramicheskaya-cherepica-vidy-svoystva/?ysclid=ltr6bnf99r103673831> (дата обращения 15.01.2024).

26. Керамическая черепица: секреты производства. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.braas.ru/blog/keramicheskaya-cherepica/?ysclid=ltr6dtz224662475867> (дата обращения 15.01.2024).

27. Стерли, Х.-Ю. Всё о кровле из керамической черепицы: производственный справочник. / Стерли, Х.-Ю., Беттгер Х., Вальтер Х.– М.: Бизнес Медиа, 2011 – 400 с.

28. Уманский, Н.Л. Производство и применение цементно-песчаной черепицы. / Н.Л. Уманский, И.А. Фальков.– М.: Промстройиздат, 1957. –104 с.

29. Минеральная черепица. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.braas.ru/pdf/86/> (дата обращения 18.01.2024).

30. Минеральная цементно-песчаная черепица BRAAS: виды и типы. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://agate.ru/clauses/articles/mineralnaya-tsementno-peschanaya-cherepitsa-braas/?ysclid=ltr8psjwjo858704029> (дата обращения 18.01.2024).

31. Что такое минеральная черепица? [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://mk05.ru/novosti/chto-takoe-mineralnaya-cherepitsa/?ysclid=ltr8sjgj6r250701582> (дата обращения 18.01.2024).

32. Черепица BRAAS – традиции европейской архитектуры [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.roofos.ru/naturalnaya/peschanaya/buklet-mineralnaya.pdf?ysclid=ltr8x3uk6f344398178> (дата обращения 19.01.2024).

33. Натуральная черепица SeaWave. [Электронный ресурс] Адрес доступа: [https://www.grandline.ru/uploads/files/peschanaya\\_cherepica/instruction\\_montazh.pdf?ysclid=ltr97nw3o876754890](https://www.grandline.ru/uploads/files/peschanaya_cherepica/instruction_montazh.pdf?ysclid=ltr97nw3o876754890) (дата обращения 19.01.2024).

34. Черепица полимерпесчаная: обзор, плюсы и минусы. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.syl.ru/article/325249/cherepitsa-polimerpeschanaya-obzor-plyusyi-i-minusyi-liniya-dlya-proizvodstva-polimerpeschanoy-cherepitsyi?ysclid=ltr9dblgxr340935470> (дата обращения 20.01.2024).

35. Технология и оборудование для полимерпесчаной черепицы. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://krovlya.guru/krovlya/cherepica/tehnologiya-i-oborudovanie-dlya-polimerpeschanoy-cherepicy.html>. (дата обращения 20.01.2024).

36. Полимерпесчаная черепица. Описание и технические характеристики. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://na-dostupnom.ru/polimerpeschanaya-cherepica/?ysclid=ltr9kkq8oo478191200> (дата обращения 20.01.2024).

37. ГОСТ Р 56688-2015. Черепица керамическая. Технические условия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200126376> (дата обращения 23.01.2024).

38. EN 1304:2013. Черепица кровельная керамическая для прерывистой укладки. Определения и технические условия на изделия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/565982049?ysclid=ltrabhafny693243243> (дата обращения 23.01.2024).

39. ГОСТ 7487-55\* Черепица цементно-песчаная. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293790/4293790902.pdf?ysclid=ltrae5ohp2256830692> (дата обращения 23.01.2024).

40. ПНСТ 545-2021 Черепица цементно-песчаная. Технические условия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181267?ysclid=ltrbm6j4vk269151582>. (дата обращения 23.01.2024).

41. Рахманкулов, Д.Л. Исторические аспекты производства и использования мелкоштучных бетонных стеновых и дорожных изделий / Д.Л.Рахманкулов, А.И.Габитов, А.Е.Чуйкин, Р.Т.Мунасипов // Башкирский химический журнал. – 2006. – Т.13. - №2. – С. 77-83.

42. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение: Учебное пособие для строительных специальностей ВУЗов / И.А.Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2004. – 701с.

43. Гайсин, А.М. Двадцатилетний опыт применения высокопустотных вибропрессованных бетонных блоков в Башкортостане / А.М.Гайсин, Р.Р.Гареев, В.В.Бабков, И.В.Недосеко, С.Ю.Самоходова // Строительные материалы. – 2015. - №4. – С. 82-85.

44. Бабков, В.В. Каменные и армокаменные конструкции на основе вибропрессованных изделий. / В.В.Бабков, Г.С.Колесник, А.И.Габитов. – Уфа: издательство «Реактив», 2001. – 182 с.

45. Златоустовский завод бетоносмесительного оборудования. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://zzbo.ru/produktsiya/vibropressy/> (дата обращения 25.01.2024).

46. Исянбаев, М.Н. Анализ основных тенденций, проблем и перспектив промышленности строительных материалов Республики Башкортостан / М.Н.Исянбаев, В.Я.Ахметов, А.У.Байгильдина, Э.Р.Чувашаева, Ю.К.Акчулпанов // Вестник Евразийской науки [Электронный ресурс]. – 2019. - №6. – URL: <http://esj.today/PDF/76ECVN619> (дата обращения: 01.02.2024).

47. Бабков, В.В. Оптимизация составов бетонных смесей в технологии производства стеновых и дорожных изделий на вибропрессовом оборудовании фирмы «Бессер» / В.В.Бабков, А.М.Гайсин, А.Е.Чуйкин, Г.С.Колесник и др. // Строительные материалы.- 2003. - №10. – С. 16-17.

48. Технология производства – гиперпрессование [Электронный ресурс] Адрес доступа: <http://gip-press.ru/index.php/8-stati/texnologiya-proizvodstva-giperpressovanie> (дата обращения 01.02.2024).

49. Оборудование для гиперпрессования [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://titan-machinery.com/ru/giperpressovanie> (дата обращения 01.02.2024).

50. В Белоречке запустили производство тротуарной плитки, дорожных бордюров и облицовочного кирпича. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.bashinform.ru/news/economy/2022-05-20/v-beloretske-zapustyat-proizvodstvo-trotuarnoy-plitki-dorozhnyh-bordyurov-i-oblitsovochnogo-kirpicha-2812025> (дата обращения 01.02.2024).

51. Леонтьев, С.В. Использование отсевов дробления карбонатных горных пород для производства гиперпрессованных изделий. / С.В.Леонтьев, В.А.Шаманов, А.Д.Курзанов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2018. – Т.2. – С 286-293.

52. Белов, В.В. Оптимизация зернового состава и влажности сырьевой смеси в технологии гиперпрессованного бетонного кирпича. / В.В.Белов // Бетон и железобетон. – 2021.- №5-6. – С. 44-47.

53. Сторожук, Н.А. Вибровакуумированный дорожный золопесчаный бетон на мелком песке. / Н.А.Сторожук, Т.М.Павленко, А.Р.Аббасова // Технологии бетонов. – 2019. - №1-2 – С. 10-13.

54. Сторожук, Н.А. Незаслуженно забытый способ уплотнения бетонных смесей. / Н.А.Сторожук, Т.М.Павленко, А.Р.Аббасова // Технологии бетонов. – 2019.- №3-4. – С. 50-54.

55. Синицина, Е.А. Применение технологии фильтрационного прессования в производстве кровельных изделий. / Е.А. Синицина, Р.М. Халиков, А.Н. Пудовкин, И.В. Недосеко // Строительные материалы. - 2020. - №1-2. - С. 66-72.

56. Ляшкевич, И.М. Технология получения высокопрочного гипсового материала методом фильтрационного прессования / И.М.Ляшкевич. // Техника, технология, организация и экономика строительства: Технология бетона и строительные материалы. – Минск, 1983. – Вып. 9. – С 125-129.

57. Синицина Е.А., Халиков Р.М., Силантьева Е.И., Пудовкин А.Н., Недосеко И.В. Модифицирующее усиление твердения прессованные гипсовых нанокompозитов // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Том 11, №5. С. 549-560. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560.

58. Ляшкевич, И.М. Высокопрочные строительные материалы и изделия на основе гипса и фосфогипса / И.М.Ляшкевич // Строительные материалы. – 1985. - №11. – С. 10-11.

59. Ляшкевич, И.М. Эффективные строительные материалы на основе гипса и фосфогипса / И.М.Ляшкевич. – Минск: Высшая школа, 1989. – 160с.

60. Джакупов, К.К. Облицовочные материалы на основе отходов камнепиления известняка-ракушечника. / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Самара, 1996. – 119 с.

61. Джакупов, К.К. Технология фильтрационного прессования в производстве облицовочных изделий. / К.К.Джакупов, И.М.Ляшкевич, В.В.Бабков, Г.С.Раптунович, И.В.Недосеко, А.Е.Чуйкин. – Самара: Изд-во Самарского отделения секции «Строительство» РИА, 1999. – 256с.

62. Бабков, В.В. Известняк-ракушечник как сырьевой компонент в составах смешанных вяжущих и композиционных материалов на их основе / В.В.Бабков, К.К.Джакупов, И.В.Недосеко, А.Н.Чикота, А.Е.Чуйкин // Современные проблемы строительного материаловедения. Академические чтения РААСН: Материалы международной конференции. – Казань: КГАСУ. – 1996. – С. 67-68.

63. Ляшкевич, И.М. Филтрпрессования технология производства гипсоволокнистых подоконных досок / И.М.Ляшкевич, А.А.Митрофанов // Строительные материалы. – 1987. - №1. – С. 19-20.

64. Бабков, В.В. Облицовочные изделия на основе промышленных отходов, получаемые по технологии филтрпрессования / В.В.Бабков, К.К.Джакупов, Р.А.Анваров, И.В.Недосеко и др. // Бюллетень строительного комплекса Республики Башкортостан. – Уфа. – 1996. - №3. – С. 26-28.

65. Баженов, Ю.М. Технология бетона: Учебник / Ю.М.Баженов. - М.: АСВ, 2007. – 248 с.

66. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г.Батраков. – М.: Технопроект, 1998. – 768с.

67. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И.Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368с.

68. Волженский, А.В. Влияние низких водоцементных отношений на свойства камня при длительном твердении / В.А.Волженский, Т.А.Карпова // Строительные материалы. – 1980. - №7. – С. 18-19.

69. Невилль, А.М. Свойства бетона: пер. с англ. / А.М.Невилль; сокр. пер. В.Д. Парфенов, Т.Ю. Якоб. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.

70. Пауэрс, Т.К. Физическая структура портландцементного теста / Т.К.Пауэрс // Химия цементов: Под ред. Х.Ф.У. Тейлора. – М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1969. – С. 300-319.

71. Данюшевский, В.С. Три вида пор в цементном камне / В.С. Данюшевский, К.А.Джабаров. // Неорганические материалы. – 1974. - №2. – С. 354-357.

72. Полак, А.Ф. Твердение минеральных вяжущих веществ. / А.Ф.Полак, В.В.Бабков, Е.П.Андреева – Уфа: Башкирское книжное издательство, 1990. – 216 с.

73. Полак, А.Ф. Механизм и кинетика твердения цементного камня / А.Ф. Полак, В.Б. Ратинов // Цемент. – 1974. - №9. – С. 15-17.

74. Рамачадран, В. Наука о бетоне (Физико-химическое бетоноведение): пер. с англ. / В.Рамачадран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн, под ред. В.Б.Ратинова. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.

75. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е.Шейкин, Ю.В.Чеховский, М.И.Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344с.

76. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я.Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 98 с.

77. Людвиг У. Исследования механизма гидратации клинкерных минералов / У. Людвиг. // Шестой международный конгресс по химии цемента. Т. II-I. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 104-121.

78. Бабков, В.В. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В.Бабков, В.Н.Мохов, С.М.Капитонов, П.Г.Комохов. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.

79. Фельдман, Р.Ф. Микроструктура и прочность гидратированного цемента / Р.Ф.Фельдман, Д.Д.Бодуэн. // Шестой международный конгресс по химии цемента. Т.П. Гидратация и твердение цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 288-294.

80. Ларионова, З.М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона. / З.М. Ларионова, Л.В. Никитина, В.Р. Гарашин. – М.: Стройиздат, 1977. – 254 с.

81. Alford, N.M. A Theoretical Argument for the Existence of High Strength Cement Pastes // Cem. And Concr. Res. – 1981. – V.11. - №4. – P. 605-610.

82. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны в практике современного строительства / В.Г.Батраков, С.С. Каприелов, А.В.Шейнфильд, Е.С.Силина // Промышленное и гражданское строительство. – 2002. - №9. – С. 23-25.

83. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон. / В.Б.Ратинов, Т.И.Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.

84. Батяновский, Э.И. Особенности технологии высокопрочного бетона, формирования свойств и использование комплексной химической добавки / Э.И.Батяновский, В.Д.Якимович // Технологии бетонов. – 2014. - №8. – С 53-55.

85. ГОСТ 24211-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/49182/?ysclid=lul4evvlny526399273> (дата обращения 20.02.2024г.).

86. Schmidt, W. The action of various superplasticizers / Wolfram Schmidt // International Concrete Production. – 2015. – No 3. – p. 30-34.

87. Каприелов, С.С. Опыт применения высокопрочных бетонов / С.С.Каприелов, А.В.Шейнфильд, А.Г.Ферджулян. // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2002. - №8. – С. 33-37.

88. Красный, И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / И.М.Красный // Бетон и железобетон. – 1987. - №5. – С.10-11.

89. Синицин, Д.А. Высокоэффективные бетоны нового поколения при строительстве зданий повышенной этажности в Республике Башкортостан / Д.А.Синицин, А.С.Салов, И.Г.Терехов, А.А.Тимофеев // Строительные материалы. – 2020. - №6. – С. 8-12.

90. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» / С.С.Каприелов, В.И.Травуш, Н.И.Карпенко // Строительные материалы. – 2006. - №10. – С. 13-17.

91. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавкой микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона / С.С.Каприелов, А.В.Шейнфильд // Бетон и железобетон. – 2011. - №7. – С. 18-21.

92. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества. / А.В.Волженский. – М.: Стройиздат, 1986 – 464 с.

93. Волженский, А.В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А.В. Волженский, И.А. Иванов, Б.Н. Виноградов – М.: Стройиздат, 1984. – 255с.

94. Ватин, Н.И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве/ Н.И.Ватин, Д.В.Петросов, А.И.Калачев, П.Лахтинен // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4(22). – С. 16-21.

95. Алехин, Ю.А. Экономическая эффективность использования вторичных ресурсов в производстве строительных материалов / Ю.А. Алехин, А.Н. Люсов. – М.: Стройиздат, 1988. – 344с.

96. Синицин, Д.А. Использование молотого гранулированного доменного шлака производства ООО «Мечел-материалы» для замены части цемента в тяжелых бетонах / Д.А. Синицин, Л.Ш. Галеева, Г.А. Юланова // Проблемы строительного комплекса России: Материалы XXI Международной НТК. – Уфа: УГНТУ, 2017. – С. 64-67.

97. Мирсаев, Р.Н. Промышленные отходы предприятий Урало-Башкирского региона в строительных технологиях / Р.Н. Мирсаев, В.В. Бабков, Р.Р.Сахибгареев, А.Е. Чуйкин [и др.] // Строительные материалы. – 2003. – № 10. – С. 22-24.

98. ГОСТ Р 52129-2003 Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/8436?ysclid=-lul8re4bf0242490917> (дата обращения 20.02.2024г.)

99. Каприелов, С.С. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформационными характеристиками / С.С.Каприелов, А.В.Шейнфильд, Г.С.Кардумян, В.Г.Дондуков // Бетон и железобетон. – 2006. - №2. – С 2-7.

100. Каприелов С.С. О подборе составов высококачественных бетонов с органиминеральными модификаторами / С.С.Каприелов, А.В.Шейнфильд, Г.С.Кардумян, И.А.Чилин // Строительные материалы. – 2017. - №12. – С. 58-63.
101. Бабков, В.В. Механизм упрочнения цементных связок при использовании тонкодисперсных наполнителей. / В.В.Бабков, П.Г.Комохов, С.М.Капитонов, Р.Н.Мирсаев //Цемент. – 1991. - №9-10. – С. 34-41.
102. Kapriyelov, S.S. Ultra-high-strength self-compacting fibrous concrete for monolithic structures / S.S. Kapriyelov, I.A. Chilin // Construction and Building Materials. – 2013. – С. 28-32.
103. Ключев, С.В. Мелкозернистый фибробетон на техногенном сырье и композиционных вяжущих: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет. – 2023.
104. Шляхова, Е.А. Влияние вида минеральной добавки микронаполнителя на свойства мелкозернистого бетона / Е.А.Шляхова, М.А.Шляхов // Инженерный вестник Дона. – 2015. - №4 (38) – С 89-92.
105. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С.Каприелов, В.Г.Батраков, А.В.Шейнфильд // Бетон и железобетон. – 2013. - №6. – С. 6-9.
106. Бабков, В.В. Аспекты долговечности цементного камня. / В.В.Бабков, А.Ф.Полак, П.Г.Комохов // Цемент. – 1988. - №3 – С. 14-16.
107. Сахибгареев, Р.Р. Структурно-технологические решения для получения модифицированных бетонов со стабильным уровнем свойств / Р.Р.Сахибгареев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. - №2 (14). – С. 266-272.
108. Сахибгареев, Р.Р. Управление структурой и применением модифицированных цементных бетонов / Р.Р.Сахибгареев. – Уфа: Изд-во «Реактив», 2010. – 130 с.
109. Ермилова, Ю.А. Моделирование процесса фильтрационного прессования микронаполненных тонкостенных изделий. / Ю.А.Ермилова, С.Ф.Коренькова // Сборник СМиИ: Самара, 2002.

110. Коренькова, С.Ф. Роль адсорбционно-связанной воды в формировании адгезионной прочности сложносоставленных цементных композиций / С.Ф.Коренькова, Ю.В.Сидоренко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. - №11. – С. 40-41.

111. Коренькова, С.Ф. Особенности формирования пористой структуры цементного камня с комплексным модификатором / С.Ф.Коренькова, В.Г.Зимин, Д.А.Горюхин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. - №3-4 (603-604). – С. 38-41.

112. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200174658> (дата обращения 22.02.2024).

113. ГОСТ 23732-79 Вода для бетонов и растворов. Технические условия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001072> (дата обращения 22.02.2024)

114. ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200011363> (дата обращения 22.02.2024).

115. ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003348> (дата обращения 22.02.2024).

116. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200114239> (дата обращения 22.02.2024).

117. ТУ 5745-022-58042865-2007 Полифункциональный модификатор бетона на основе нафталинсульфоната [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://polyplast-un.ru/catalog/stroitel'naya-khimiya/dobavki-dlya-betonov/polifunksionalnye-dobavki/pfm-nlk> (дата обращения 24.02.2024).

118. Ускоритель-пластификатор для бетонных смесей [Электронный ресурс] Адрес доступа: [https://www.sts124.ru/goods/149872469-uskoritel\\_plastifikator\\_shtaynberg\\_upbs\\_ma](https://www.sts124.ru/goods/149872469-uskoritel_plastifikator_shtaynberg_upbs_ma) (дата обращения 24.02.2024).

119. Ключев, С.В. Фибробетон и его применение в строительстве / С.В.Ключев, А.В.Ключев, А.В.Шаповалова, С.В.Золотарева и др. // В сборнике: Расширение

применения местных сырьевых материалов и отходов предприятий Республики Мордовия при изготовлении строительных материалов и изделий. Материалы международной НТК. – Саранск.- 2023. – С. 214-217.

120. Бабков, В.В. Сталефибробетон в производстве изделий и конструкций дорожного назначения / В.В.Бабков, И.В.Недосеко, Р.Ш.Дистанов, М.А.Ивлев и др. // Жилищное строительство. – 2010. - №10. – С. 40-45.

121. Amran, M. Fibre-reinforced foamed concretes: a review / M.Amran, R.Feduk, N. Vatin, Y. Lee and other // Materials. – 2020. - №19. – p. 1-36.

122. Трофимов, Б.Я. Исследование свойств синтетических пигментов для декоративного бетона / Б.Я.Трофимов, Л.Я.Крамар // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. - №15 (191). – С. 36-38.

123. Рузавин, А.А. Применение базовых железноокислых пигментов для получения широкого ряда оттенков декоративных бетонов / А.А.Рузавин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 19. - №2. – С. 44-49.

124. ГОСТ 310.4-81 Цемент. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001227> (дата обращения 24.02.2024).

125. СТО 70386662-001-2005 Сухие ремонтные смеси ЕМАСО. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data1/52/52104/index.htm> (дата обращения 24.02.2024).

126. ГОСТ 10181-2014 Смеси бетонные. Методы испытаний [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200115733> (дата обращения 24.02.2024).

127. Паспорт отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве» [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405781899/> (дата обращения 27.02.2024).

128. Оратовская, А.А. Использование отходов производства кальцинированной соды для получения известьесодержащих вяжущих и строительных материалов на их основе / А.А.Оратовская, Д.А.Синицин,

Л.Ш.Галеева, В.В.Бабков, А.А. Шатов // Строительные материалы. - 2012. - №2. - С.52-54.

129. Вагапов, Р.Ф. Использование отходов промышленных предприятий при производстве строительных материалов на примере Республики Башкортостан / Р.Ф. Вагапов, Д.А. Синицин, А.А. Оратовская, Г.В. Тэненбаум // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 3(54). – С. 76-82.

130. Рязанов, А.Н. Твердые отходы содового производства – важный резерв расширения сырьевой базы получения извести и низкоэнергоемких бесклинкерных вяжущих на ее основе / А.Н.Рязанов, Д.А. Синицин, Г.Ю. Шагигалин, М.Р. Бикбулатов, И.В. Недосеко // Строительные материалы. 2020. №4-5. С. 14-17.

131. ТУ 2149-334-00203312-2015 Минеральный продукт содового производства [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/437181952> (дата обращения 27.02.2024).

132. Мамулат, С.Л. Анализ состава, свойств и перспективы применения минерального продукта содового производства АО «Башкирская содовая компания» для изготовления энергоэффективных вяжущих / С.Л.Мамулат, В.В.Бабков, Э.М.Давыдов, Г.В.Коган и др. // Строительные материалы. – 2022.- №3. – С. 61-73.

133. ГОСТ 56592-2015 Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200124405> (дата обращения 27.02.2024г.).

134. ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901703627> (дата обращения 27.02.2024).

135. ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Методы определения водопоглощения [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901706262> (дата обращения 27.02.2024).

136. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200100908> (дата обращения 27.02.2024).

137. Синицина, Е.А. Технология фильтрационного прессования в производстве кровельных и облицовочных изделий повышенной прочности и долговечности // Е.А. Синицина, Т.В. Печенкина, Л.Н. Ломакина, О.С. Дорофеева, И.В. Недосеко // Строительные материалы. - 2022. - №3. С. 74-81.

138. Синицина Е.А. Особенности производства и применения цементно-песчаной черепицы, получаемой способом фильтрационного прессования / Е.А.Синицина // Бюллетень строительной техники. - 2023. - №12.

139. Сахибгареев, Р.Р. Особенности структурообразования цементного камня на поздних стадиях твердения / Р.Р.Сахибгареев, В.В.Бабков, А.Е.Чуйкин, Ром. Р.Сахибгареев // Строительные материалы. – 2008. - №10. – С. 7-10.

140. ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200100906> (дата обращения 03.03.2024).

141. ГОСТ 31384-2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200157129> (дата обращения 03.05.2024).

142. СП 28.13330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456069587> (дата обращения 03.03.2024).

143. ГОСТ 7025-91 Кирпич и камень керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и морозостойкости. [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294853/4294853178.htm> (дата обращения 05.03.2024).

144. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200164028> (дата обращения 05.03.2024).

145. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости [Электронный ресурс] Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200163874> (дата обращения 05.03.2024).

**Приложение А – Скан-копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ**

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2020663812**

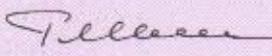
**«Программа расчета удельной поверхности сырьевой смеси  
и среднеповерхностного размера частиц»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (RU)*

Авторы: *Синицина Екатерина Александровна (RU), Пудовкин Александр Николаевич (RU), Салов Александр Сергеевич (RU), Недосеко Игорь Вадимович (RU)*

Заявка № **2020663041**  
Дата поступления **26 октября 2020 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **02 ноября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.И. Ивлиев**



**Приложение Б. Скан-копия ТУ 23.61.11-027-02069450-2024**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»**

**УТВЕРЖДАЮ:**

Директор Департамента  
развития науки и технологического  
предпринимательства  
ФГБОУ ВО «УГНТУ»  
Р.У. Рабаев  
\_\_\_\_\_ 2024г.



**ЧЕРЕПИЦА ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНАЯ ПЛОСКАЯ ЛЕГКОЧНАЯ,  
ИЗГОТАВЛИВАЕМАЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО  
ПРЕССОВАНИЯ  
Технические условия**

**ТУ 23.61.11-027-02069450-2024  
Вводятся впервые**

Профессор кафедры «Строительные  
конструкции», д.т.н., профессор

И. В. Недосеко

Старший преподаватель кафедры  
«Строительные конструкции»

Е.А. Синицина

Уфа 2024

## **1 Область применения**

Настоящие Технические условия устанавливает требования, предъявляемые к цементно-песчаной черепице плоской ленточной, изготавливаемой методом фильтрационного прессования и используемой для устройства кровель скатных крыш зданий различного назначения.

Настоящий стандарт определяет требования к техническим параметрам изделий и к методам испытаний.

Требования настоящих технических условий являются обязательными (кроме оговоренных в тексте как рекомендуемые или справочные).

Настоящие технические условия могут быть применены для целей сертификации.

## **2 Нормативные ссылки**

В настоящих Технических условиях использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху санитарной зоны.

ГОСТ 12.1.010-76. ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.2.003-91. ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.3.002-2014. ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.3.009-76. ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.3.020-80. ССБТ. Процессы перемещения грузов на предприятиях. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.4.021-75. ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования.

ГОСТ 12.4.137-2001. Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от нефти, нефтепродуктов, кислот, щелочей, нетоксичной и взрывоопасной пыли. Технические условия.

ГОСТ 12.4.254-2013. ССБТ. Средства индивидуальной защиты глаз и лица при сварке и аналогичных процессах. Общие технические условия.

ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия.

ГОСТ 288-72. Войлок технический тонкошерстый. Технические условия.

ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. Технические условия.

ГОСТ 7025-2019. Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения плотности, водопоглощения и контроля морозостойкости.

ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия.

ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.

ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

ГОСТ 12730.0-2020. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости.

ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.

ГОСТ 13015-2012. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения.

ГОСТ 14192-96. Маркировка грузов.

ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

ГОСТ 23009-2016. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Условные обозначения (марки).

ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия.

ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия.

ГОСТ 25781-2018. Формы стальные для изготовления железобетонных изделий. Технические условия.

ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.

ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов.

ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия.

ГОСТ Р 52129-2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия.

ГОСТ Р 58941-2020 Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений. Общие положения

СП 49.13330.2010 (СНиП 12-03-2001). Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования.

СНиП 12-04-2002. Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство.

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

### 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

**3.1 Цементно-песчаная черепица, изготавливаемая по технологии фильтрационного прессования** (далее по тексту – черепица): кровельный материал из цементно-песчаной смеси с добавлением минеральных наполнителей, пигментов и базальтовой фибры, изготавливаемый по одностадийной технологии методом фильтрационного прессования с последующей термовлажностной обработкой. Цементно-песчаная черепица, получаемая методом фильтрационного прессования, не требует нанесения в процессе изготовления дополнительного покрытия.

**3.2 Плоская ленточная черепица** (черепица «бобровый хвост»): черепица плоской формы с закругленной передней кромкой, не имеющая соединения в фальц.

**3.3 Изделие:** единичный элемент цементно-песчаной черепицы.

**3.4 Габаритные размеры черепицы:** Наибольшие (номинальные) длина и ширина черепицы.

**3.5 Кроющие (полезные) размеры:** Длина и ширина уложенной, видимой сверху черепицы, измеренной в продольном и поперечном направлениях.

**3.6 Обрешетка:** конструкция или сплошной настил, являющиеся основанием для крепления черепицы.

**3.7 Шипы:** выступы на нелицевой стороне черепицы, используемые для крепления черепицы на обрешетку.

**3.8 Разлом:** дефект структуры, выражающийся в разделении черепицы на два или несколько обломков.

**3.9 Раковина:** дефект поверхности диаметром более 7 мм, который выражается в потере материала на поверхности видимой части кровельной черепицы в уложенном состоянии.

**3.10 Отбитость (скол):** дефект от механического повреждения грани, ребра, угла черепицы, не распространяющийся на всю толщину черепицы.

**3.11 Трещина:** разрыв черепицы без разрушения ее на части, через всю толщину черепицы, видимый невооруженным глазом.

**3.12 Трещина сквозная:** трещина, проходящая через всю толщину изделия, протяженностью более половины изделия.

**3.13 Заусенец:** дефект черепицы в виде сплошного или прерывистого выступа на ребрах (кромке), образовавшийся в процессе формования.

#### 4 Технические требования

4.1 Цементно-песчаную черепицу по технологии фильтрационного прессования изготавливают из портландцемента, песка, воды, минерального наполнителя, суперпластифицирующих добавок и пигментов.

4.2 Черепица должна быть окрашена по массе. Нанесение дополнительного декоративного покрытия не требуется. Допускается производство черепицы серого цвета, не окрашенной по массе.

4.3 Цементно-песчаная плоская ленточная черепица должна иметь следующие размеры:

- габаритные: длина – 365мм, ширина – 155мм;
- кроющие (полезные): длина – 160мм, ширина – 155мм.

Высота шипов черепицы должна быть не менее 10мм.

Предельные отклонения размеров не должны превышать  $\pm 2,0\%$  длины и ширины черепицы.

Масса  $1\text{м}^2$  кровельного покрытия должна составлять не более 54 кг. Исходя из того, что на  $1\text{м}^2$  кровли приходится 40,3 изделий, вес одной черепицы не должен превышать 1,34кг. Толщина черепицы должна составлять  $10\pm 1$  мм.

Форма и размеры цементно-песчаной плоской ленточной черепицы представлены на рисунке 1.

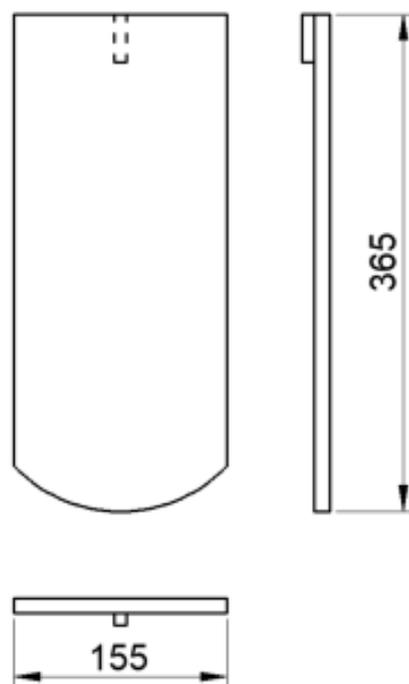


Рисунок 1 – Габаритные размеры и форма цементно-песчаной плоской ленточной черепицы

4.4 Условное обозначение черепицы должно состоять из буквенного обозначения наименования ЧЦП-ПЛ (черепица цементно-песчаная плоская ленточная), габаритных и кроющих размеров в мм и обозначения настоящих Технических условий. Пример условного обозначения:

ЧЦП-ПЛ-365×155-160×155 ТУ 23.61.11-027-02069450-2024

4.5 Черепица должна быть правильной формы с гладкими поверхностями и ровными краями, без короблений и трещин. Требования к внешнему виду и габаритным размерам черепицы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Требования к габаритным размерам и внешнему виду черепицы

№ п/п	Наименование показателя	Нормативные требования
1	Внешний вид: - отбитости на кроющей поверхности - отбитости углов и ребер на перекрываемой стороне  - наличие трещин	не допускаются длиной не более 30мм в количестве не более двух не допускается
2	Габаритные размеры: - длина, мм; - ширина, мм; - отклонение от прямолинейности ребер (боковых продольных кромок), % - отклонение от плоскостности черепицы, %	365 155  не более 1,5  не более 1,5
Примечания: 1. Разнотонность поверхности черепицы не является дефектом; 2. На краях черепицы допускаются заусенцы. Допускается шероховатость поверхности черепицы.		

4.6 Прочность черепицы характеризуется разрушающей нагрузкой при испытании на изгиб в возрасте 28 суток нормального твердения. Разрушающая нагрузка при испытании черепицы на изгиб должна составлять не менее 600Н. Отпускная прочность черепицы (после пропаривания) должна быть не менее 70% от прочности в возрасте 28 суток нормального твердения.

4.7 Черепица должна быть водонепроницаемой.

4.8 Морозостойкость черепицы должна составлять не менее 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания без видимых признаков разрушения (расслоение, шелушение, растрескивание, выкрашивание).

4.9 Удельная эффективная активность естественных радионуклидов  $A_{эфф}$  не должна быть более 370 Бк/кг.

## **5 Требования безопасности и охраны окружающей среды**

5.1 Цементно-песчаные черепицы являются нетоксичными, негорючими, не взрывоопасными изделиями, не оказывают при работе с ними общетоксического действия на организм человека (V класс опасности).

5.2 При производстве цементно-песчаной черепицы не должны применять опасные твердые или жидкие вещества. По классам опасности и токсикологии - гигиеническим характеристикам предельно допустимая концентрация пыли исходных материалов в воздухе рабочей зоны составляет не более 10Мг/м<sup>3</sup>.

Контроль концентрации пыли производить в соответствии с указаниями ГОСТ 12.1.005.

5.3 При изготовлении свай следует руководствоваться:

- СП 49.13330.2010;
- СНиП 12-04;
- Правилами противопожарного режима в Российской Федерации, а также ГОСТ 12.3.002, ГОСТ 12.2.003, ГОСТ 12.1.004, ГОСТ 12.1.010.

5.4 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005.

5.5 Помещения, в которых производится дозировка составляющих цементно-песчаной смеси, должны быть оборудованы системой приточно-вытяжной вентиляции по ГОСТ 12.4.021, СП 60.13330. Рабочий персонал должен быть обеспечен респираторами.

5.6 Все рабочие должны обеспечиваться спецодеждой, а также рукавицами по ГОСТ 12.4.110 и обувью по ГОСТ 12.4.137.

5.7 Опасными технологическими операциями при изготовлении, хранении и отгрузки свай являются перемещение в цехе и на складе готовой продукции поддонов с черепицей, а также погрузка поддонов с черепицей в транспортные средства.

5.8 При погрузочно-разгрузочных работах должны соблюдаться требования безопасности по ГОСТ 12.3.009.

5.9 При перемещении поддонов с черепицей должны соблюдаться требования безопасности по ГОСТ 12.3.020.

5.10 Материалы, применяемые для приготовления мелкозернистого бетона, по удельной эффективной активности естественных радионуклидов должны соответствовать требованиям ГОСТ 30108.

5.11 Потребитель обязан обеспечивать безопасность при перевозке и разгрузке поддонов с черепицей, применяя специальные проверенные грузоподъемные механизмы.

5.12 Цементно-песчаная черепица является безопасной для окружающей природной среды, здоровья и генетического фонда человека при изготовлении, хранении, транспортировании и применении при условии выполнения всех требований настоящих технических условий.

## **6 Маркировка и упаковка.**

6.1 На монтажную (не лицевую) поверхность каждой черепицы наносят любым способом товарный знак или краткое наименование предприятия-изготовителя, месяц и год изготовления. Предприятие-изготовитель имеет право наносить на черепицу дополнительную информацию, не противоречащую требованиям настоящих Технических условий и позволяющую идентифицировать черепицу и ее изготовителя.

6.2 При упаковке черепицу укладывают ребром на поддон рядами по ширине, плотно одна к другой, и крепят упаковочной лентой, обеспечивающей сохранность упаковочной единицы при хранении и транспортировании. Число рядов черепицы, уложенных друг на друга на поддоне, должно быть не более четырех. Каждый ряд по высоте прокладывается тонкими досками, рейками или соломенными жгутами. Поддон с черепицей упаковывают в термоусадочную пленку, формируя транспортный пакет (упаковочную единицу). Масса транспортного пакета не должна превышать грузоподъемности поддона.

6.3 В одной упаковочной единице должна быть черепица одного условного обозначения и относящаяся к одной партии.

6.4 По согласованию с потребителем допускаются другие виды упаковки. При транспортировании черепицы запрещается нагрузка ее навалом и выгрузка сбрасыванием.

6.5 Маркировку наносят на каждый транспортный пакет (упаковочную единицу), сформированную в соответствии с пунктом 6.2. Маркировку наносят непосредственно на упаковку или на этикетку, которую наклеивают на упаковку, или на ярлык, прикрепляемый к упаковке способом, обеспечивающим его сохранность при транспортировании.

6.6 Маркировочная надпись должна включать:

- наименование предприятия-изготовителя (и/или его товарный знак) и адрес;
- условное обозначение черепицы;
- число изделий в упаковочной единице, шт.;
- номер партии и дату изготовления;
- штамп службы технического контроля.

## 7 Правила приемки

7.1 Черепица должна быть принята службой технического контроля предприятия-изготовителя.

7.2 Черепицу принимают партиями. Партия должна состоять из черепицы одного вида, размера, с поверхностью одного цвета и одинаковой фактуры, изготовленной из одних сырьевых материалов, на одной технологической линии при неизменных технологических параметрах. Объем партии устанавливается в количестве не более суточной выработки предприятия-изготовителя.

7.3 Качество черепицы обеспечивают входным контролем сырья и материалов, производственным операционным контролем и подтверждают приемочным контролем готовых изделий. Приемочный контроль включает в себя прямо-сдаточные и периодические испытания.

7.4 При проведении испытаний методом случайного отбора из разных мест партии отбирают образцы черепицы в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Число отбираемых образцов черепицы для проведения испытаний.

Наименование показателя	Число отбираемых образцов, штук	Вид испытаний		Периодичность контроля	Метод испытаний по пункту настоящих ТУ
		Приемо-сдаточные	Периодические		
Внешний вид и форма	25	+	-	Каждая партия	8.1
Габаритные размеры	25	+	-	Каждая партия	8.1
Водонепроницаемость	3	+	-	Каждая партия	8.3
Разрушающая нагрузка при испытании на изгиб	5	+	-	Каждая партия	8.4
Морозостойкость	5	-	+	Один раз в квартал или при изменении сырья и технологических параметров	8.5
Масса 1м <sup>2</sup> кровельного покрытия из черепицы	5	-	+		8.2
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов $A_{эфф}$	3	-	+	1 раз в год	8.6

Отобранные образцы черепицы проверяют на соответствие требованиям настоящих ТУ по внешнему виду, размерам и правильности формы, а затем испытывают.

Результаты периодических испытаний распространяются на все поставляемые партии черепицы до проведения следующих периодических испытаний.

7.5 Удельную эффективную активность естественных радионуклидов  $A_{эфф}$  контролируют при входном контроле по данным предприятия – поставщика сырьевых материалов. В случае отсутствия данных от поставщика сырьевых материалов испытания черепицы по этому показателю следует проводить не реже одного раза в год в аккредитованных испытательных лабораториях.

7.6 Партию принимают, если результаты испытаний по всем показателям соответствуют требованиям настоящих ТУ. При получении неудовлетворительных результатов испытаний хотя бы по одному из показателей проводят повторные испытания по этому показателю, для этого отбирают удвоенное количество образцов черепицы от той же партии. При получении неудовлетворительных результатов повторных испытаний партия приемке не подлежит.

7.7 В случае несоответствия партии черепицы требованиям настоящих ТУ по внешнему виду, правильности формы и размерам допускается ее повторное предъявление для контроля после поштучной разбраковки.

7.8 Каждая партия черепицы должна сопровождаться документом о качестве, в котором указывают:

- наименование предприятия-изготовителя и/или его товарный знак;
- наименование и условное обозначение черепицы;
- номер и дату выдачи документа;
- номер партии и дату изготовления;
- количество черепицы в партии, штук;
- результаты испытаний на водонепроницаемость;
- разрушающую нагрузку при испытании на изгиб;
- результаты испытаний на морозостойкость.

На документе о качестве должен быть штамп и подпись службы технического контроля.

## **8. Методы испытаний.**

### **8.1 Определение геометрических размеров и правильности формы**

8.1.1 Размеры изделий, высоту шипов, длину отбитостей углов и ребер измеряют металлической линейкой по ГОСТ 427 или штангенциркулем по ГОСТ 166. Погрешность измерений  $\pm 1$ мм.

8.1.2 Наличие трещин определяют визуально и путем простукивания металлическим молоточком массой 0,25кг. При простукивании черепица должна издавать чистый недребезжащий звук (низкий, быстро затухающий глухой звук свидетельствует о наличии в черепице внутренних дефектов - трещин).

8.1.3 Отклонение от прямолинейности ребер плиты определяют как отношение значения наибольшего зазора  $\Delta l$  между ребром черепицы и выверенной поверхностью опорной плиты к длине измеряемого участка плиты  $L$  и выражают в процентах. Длина измеряемого участка ребра должна составлять две трети от габаритной длины черепицы. За результат принимают наибольшее из полученных значений по двум продольным ребрам.

8.2 Определение массы  $1 \text{ м}^2$  кровельного покрытия выполняют путем взвешивания образцов черепицы в состоянии естественной влажности на весах с погрешностью измерения  $\pm 2$ г. За результат принимают среднее арифметическое значение взвешивания пяти образцов. Массу  $1 \text{ м}^2$  кровельного покрытия вычисляют умножением средней массы черепицы на количество штук черепицы на  $1 \text{ м}^2$  кровельного покрытия.

### 8.3 Определение водонепроницаемости

#### 8.3.1 Средства измерения:

- специальная разъемная рамка размерами по длине и ширине на 10 мм меньше габаритных размеров черепицы;
- опоры для установки образцов;
- герметизирующий материал (например, пластилин).

8.3.2 В качестве образцов используют целую черепицу в воздушно-сухом состоянии.

8.3.3 Для определения водонепроницаемости черепицу укладывают на опоры лицевой поверхностью вверх и устанавливают на ней специальную разъемную рамку с размерами по длине и ширине на 10мм меньше габаритных размеров образца. Зазоры между рамкой и кромками черепицы герметизируют, при этом нижняя сторона черепицы должна быть хорошо видна. Рамку заполняют водой так, чтобы уровень воды находился на расстоянии не менее 10мм над самым высоким местом черепицы и выдерживают в течение 4 часов. Во время испытания поддерживают первоначальный уровень воды в рамке. По истечении 4 часов осматривают нижнюю поверхность черепицы и

устанавливают наличие или отсутствие на ней капель воды. Отсутствие капель воды свидетельствует о водонепроницаемости изделия.

#### 8.4 Определение разрушающей нагрузки при испытании на изгиб.

##### 8.4.1 Средства испытания:

- машина для испытаний, имеющая регулятор нагрузки с относительной погрешностью измерения не более 2%;
- линейка измерительная металлическая по ГОСТ 427;
- войлок толщиной 5-10 мм по ГОСТ 288;
- приспособление для испытаний на растяжение при изгибе с двумя нижними и одной верхней цилиндрическими опорами длиной не менее ширины образца. Расстояние между нижними опорами должно быть регулируемым. Все опоры должны равномерно прилегать к образцу по ширине.

##### 8.4.2 Подготовка образцов.

В качестве образцов используют целую черепицу. Испытание проводят на образцах в воздушно-сухом состоянии. Перед испытанием поверхность черепицы в местах расположения нижних опор и месте приложения нагрузки выравнивают по уровню полосками из гипсового раствора шириной 20-30мм или прокладками из войлока.

8.4.3 При испытании образец устанавливают на двух опорах машины для испытаний лицевой поверхностью в сторону приложения нагрузки. Расстояние между осями опор должно составлять  $\frac{2}{3}$  длины черепицы. Нагрузки прикладывают в середине продета и равномерно распределяют по ширине образца. Нагрузка на образец должна возрастать непрерывно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20-60 секунд после начала испытаний. Испытания производят до разрушения черепицы и фиксируют нагрузку, при которой произошло разрушение. За результат принимают наименьшее значение из результатов испытаний пяти образцов.

8.5 Морозостойкость черепицы определяют по ГОСТ 7025 методом объемного замораживания. Оценку степени повреждений всех образцов проводят через каждые пять циклов замораживания-оттаивания.

8.6 Удельную эффективную активность естественных радионуклидов  $A_{эфф}$  определяют по ГОСТ 31108.

## **9 Транспортирование и хранение**

9.1 Черепицу транспортируют любым видом транспорта с соблюдением правил перевозки грузов, установленных для данного вида транспорта. Черепицу транспортируют в пакетированном виде.

9.2 Транспортные пакеты следует хранить в упакованном виде в закрытых помещениях или под навесом. При хранении не допускается устанавливать поддоны друг на друга.

9.3 При погрузочно-разгрузочных работах следует соблюдать правила безопасности, установленные ГОСТ 12.3.009 и ГОСТ 12.3.020. Не допускается удары по черепице и сбрасывание ее с любой высоты.

## **10 Указания по применению**

10.1 Черепицу применяют с учетом действующих сводов правил по проектированию и производству работ, а также в соответствии с проектной документацией на возведение зданий и сооружений.

## **11 Гарантии изготовителя**

11.1 Предприятие-изготовитель гарантирует соответствие черепицы требованиям настоящего стандарта при условии соблюдения потребителем рекомендаций производителя по транспортированию, хранению, эксплуатации, а также применения и монтажа изделия в соответствии с инструкциями производителя, действующей нормативной и проектной документацией.

11.2 Гарантийный срок службы черепицы устанавливают в договоре на поставку, но не менее трех лет со дня отгрузки изготовителем.

## Приложение В. Акт и протоколы испытаний опытной партии цементно-песчаной плоской ленточной черепицы, изготовленной по технологии фильтрационного прессования

ФГБОУ ВО «УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
 НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
 ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ  
 Заключение о состоянии измерений в лаборатории № ЦСМ РБ.ОСИ.СТ.00143,  
 выдано ФБУ «ЦСМ им. А.М. Муратшина в РБ», действительно до 13.10.2026г.  
 Адрес: 450080, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Менделеева, 195

### АКТ испытания опытной партии цементно-песчаной плоской ленточной черепицы, изготовленной по технологии фильтрационного прессования

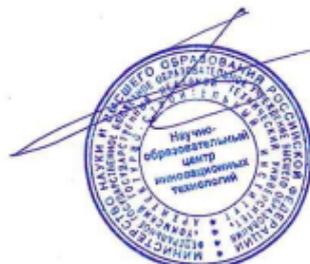
В испытательной лаборатории Научно-образовательного центра инновационных технологий Архитектурно-строительного института ФГБОУ ВО «УГНТУ» в период с 16.10.2023г. по 26.04.2024г. были проведены лабораторные испытания опытной партии цементно-песчаной плоской ленточной черепицы, изготовленной по одностадийной технологии фильтрационного прессования с отдельно-последовательной подачей смеси в форму. Опытная партия цементно-песчаной черепицы была изготовлена Сенициной Е.А. в период 11-16.09.2023г. в рамках выполнения диссертационной работы. Испытания были проведены по следующим показателям «разрушающая нагрузка при изгибе», «водонепроницаемость», «морозостойкость».

Результаты испытаний оформлены в виде протоколов испытаний №Н/26-2023 от 16.10.2023г., №Н/27-2023 от 19.10.2023г., №Н/15-2024г. от 26.04.2024г. (прилагаются к настоящему акту).

По результатам испытаний установлено, что все испытанные изделия из опытной партии цементно-песчаной черепицы соответствуют требованиям нормативной документации (ПНСТ 545-2021 «Черепица цементно-песчаная. Технические условия» ТУ 23.61.11-027-02069450-2024 «Черепица цементно-песчаная плоская ленточная, изготавливаемая по технологии фильтрационного прессования. Технические условия»).

Приложения: протоколы испытаний №Н/26-2023 от 16.10.2023г., №Н/27-2023 от 19.10.2023г., №Н/15-2024г. от 26.04.2024г.

Руководитель Испытательной лаборатории  
 НОЦИТ Архитектурно-строительного института  
 ФГБОУ ВО «УГНТУ», к.т.н., доцент



Р.Р.Сахибгареев

26 апреля 2024г

ФГБОУ ВО «УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
 НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
 ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Заключение о состоянии измерений в лаборатории № ЦСМ РБ.ОС.И.СТ.00143, выдано ФБУ «ЦСМ им. А.М. Мурашова в РБ», действительно до 13.10.2026г.  
 Адрес: 450080, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Менделеева, 195



Протокол № Н/26-2023 испытаний образцов плоской ленточной цементно-песчаной черепицы по показателю «разрушающая нагрузка при изгибе»  
 Заказчик: Синицина Е.А.

Наименование ИД на изделие: ПНСТ 545-2021 «Черепица цементно-песчаная. Технические условия»

Наименование ИД на методы испытаний: ПНСТ 545-2021 «Черепица цементно-песчаная. Технические условия», ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Методы контроля и оценки прочности»

Наименование оборудования: Пресс гидравлический ИП-100 (зав. №2262, поверка до 19.09.2024г.), штангенциркуль ШЦ-1-250 (зав. № 68067137, поверка до 21.09.2024г.), линейка металлическая длиной 500 мм (инв. № 131, поверка до 03.08.2024г.), весы МК-15.2-A21 (зав. № 123961, поверка до 13.07.2024г.)

Производитель продукции: Образцы цементно-песчаной черепицы изготовлены Синицной Е.А.

Дата изготовления образцов: 11-16.09.2023г.

Дата испытания образцов: 16.10.2023г.

Маркировка изделия	Толщина изделия, мм	Масса изделия, г.	Нормируемое значение разрушающей нагрузки при изгибе, Н	Фактическое значение разрушающей нагрузки при изгибе, Н
3-1	11	1340	550	740
3-2	11	1320		770
3-3	11	1299		700
3-4	11	1335		820
3-5	11	1331		750
3-6	11	1344		850
3-7	11	1315		680
3-8	11	1326		720
3-9	11	1309		790
3-10	11	1318		650
Среднее значение			1323	720

Вывод: Все испытанные образцы цементно-песчаной черепицы по показателю «разрушающая нагрузка при изгибе» соответствуют требованиям ПНСТ 545-2021.

Испытатель, техник

Г.Ф. Ишбулдина

ФГБОУ ВО «УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
 НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
 ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Заключение о состоянии измерений в лаборатории № ЦСМ РБ.ОС.СТ.00143, выдано ФБУ «ЦСМ им. А.М. Муратшина в РБ», действительно до 13.10.2026г.  
 Адрес: 450080, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Менделеева, 195



**Протокол № Н/27-2023 испытаний образцов плоской легочной цементно-песчаной черепицы по показателю «водонепроницаемость»**

Заказчик: Синицина Е.А.

Наименование НД на изделие: ПНСТ 545-2021 «Черепица цементно-песчаная. Технические условия»

Наименование НД на методы испытаний: ПНСТ 545-2021 «Черепица цементно-песчаная. Технические условия»

Наименование оборудования: штангенциркуль ШПН-250 (зав. № 68067137, поверка до 21.09.2024г.), линейка металлическая длиной 500 мм (инв. № 13),  
 поверка до 03.08.2024г.), весы МК-15.2-A21 (зав. № 123961, поверка до 13.07.2024г.)

Производитель продукции: Образцы цементно-песчаной черепицы изготовлены Синициной Е.А.

Дата изготовления образцов: 11-16.09.2023г.

Дата испытания образцов: 17-19.10.2023г.

Маркировка изделия	Толщина изделия, мм	Масса изделия, г.	Нормируемое значение	Фактическое значение
3-11	11	1308	Не допускается увлажнение нижней поверхности (наличия мокрого пятна на нижней поверхности) после 48 часов выдерживания	Отсутствует мокрое пятно на нижней поверхности черепицы
3-12	11	1319		Отсутствует мокрое пятно на нижней поверхности черепицы
3-13	11	1332		Отсутствует мокрое пятно на нижней поверхности черепицы
3-14	11	1310		Отсутствует мокрое пятно на нижней поверхности черепицы
3-15	11	1303		Отсутствует мокрое пятно на нижней поверхности черепицы

Вывод: Все испытанные образцы цементно-песчаной черепицы по показателю «водонепроницаемость» соответствуют требованиям ПНСТ 545-2021.

Испытатель, техник

Г.Ф. Ишбулдина



## Приложение Г. Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО УГНТУ)  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

### СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Результаты диссертации Сенициной Екатерины Александровны на тему «Технология фильтрационного прессования в производстве цементно-песчаной черепицы повышенной прочности и долговечности» используются в учебном процессе Архитектурно-строительного института Уфимского государственного нефтяного технического университета у бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль подготовки «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций».

Первый заместитель директора,  
к.т.н., доцент



И.Г.Терехов