

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный политехнический университет»

На правах рукописи



КУЛЬШАРОВ БЕРИКБАЙ БАЛТАБАЕВИЧ

**ШЛАКОЩЕЛОЧНОЙ ЛЕГКИЙ БЕТОН С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ НА
ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ПЕРЕРАБОТКИ КУКУРУЗЫ**

Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Акулова Марина Владимировна



Иваново 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Аналитический обзор теоретических исследований о физико-химическом составе стержней кукурузных початков и их возможности использования для производства лёгких бетонов.....	14
1.1. Общие сведения о лёгких бетонах на основе целлюлозных органических заполнителей.....	15
1.2. Физико-механические свойства лёгкого бетона на основе целлюлозных органических заполнителей.....	17
1.3. Возможности и сырьевая база России и Казахстана по производству шлакощелочных лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей.....	22
1.4. Направления разработки и улучшения свойств композиционных материалов на целлюлозных заполнителях растительного происхождения.....	25
Выводы по 1-главе	33
Глава 2. Характеристика исходного сырья, материалов и методы исследования шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков.....	35
2.1. Характеристика исходного сырья и материалов.....	35
2.2. Влияние соотношения компонентов на свойства вяжущего материала и научные принципы его выбора.....	43
2.3. Методы и методики исследований, приборы и оборудование.....	45
Выводы по 2 главе.....	52
Глава 3. Структурообразование и технологические особенности изготовления шлакощелочных легких бетонов на основе стержней кукурузных початков.....	54
3.1. Исследование влияния водорастворимых веществ, содержащихся в стержнях кукурузных початков, на свойства и структуру камня шлакощелочного вяжущего.....	55

3.2. Технологическая схема извлечения экстрактов из стержней кукурузных початков.....	59
3.3. Исследование влияния стержней кукурузных початков на физико-механические свойства шлакощелочного вяжущего лёгкого бетона.....	62
3.4. Исследование влияния стержней кукурузных початков на структуру шлакощелочного вяжущего легкого бетона методами тонкого анализа...	72
3.5. Подбор гранулометрического состава, вида и формы стержней кукурузных початков при измельчении для получения легкого бетона на основе стержней кукурузных початков.....	84
3.5.1. Подбор оборудования для измельчения стержней кукурузных початков при использовании их в составе шлакощелочных легких бетонов.....	84
3.5.2. Подбор гранулометрического состава и влажности стержней кукурузных початков.....	87
3.6. Влияние фракции стержней кукурузных початков на физические и физико-механические свойства легкого бетона.....	93
3.7. Изучение влияния расхода шлакощелочного вяжущего и целлюлозного органического заполнителя на физико-механические свойства лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков.....	99
3.8. Исследование адгезии между кукурузным наполнителем и шлакощелочным камнем.....	102
Выводы по 3-главе.....	110
Глава 4. Определение состава, исследование физических свойств и разработка технологии производства шлакощелочного легкого бетона с заполнителем из стержней кукурузных початков.....	113
4.1. Проектирование состава шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков методом планирования эксперимента.....	113
4.2. Исследования свойств полученного шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков.....	121

4.2.1. Влияние вида вяжущего на физико-механические свойства шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков.....	121
4.2.2. Влияние влажности на прочностные характеристики шлакощелочного лёгкого бетона на кукурузном заполнителе.....	124
4.2.3. Исследования теплопроводности, биостойкости, морозостойкости и огнестойкости разработанных шлакощелочных лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков.....	126
Выводы по 4-главе.....	128
Глава 5. Разработка технологической схемы производства шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков и анализ технико-экономической эффективности ..	131
5.1. Технология производства шлакощелочного лёгкого бетона на основе измельчённых кукурузных початков.....	131
5.2. Описание методики и технологического режима производства легкого бетона на основе стержней кукурузных початков и шлакощелочного вяжущего.....	134
5.3. Отличие новой методики производства шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков.....	138
5.4. Производственное внедрение шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков и его технико-экономическая эффективность.....	139
Выводы по 5-главе.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	147
Приложение 1.....	162
Приложение 2.....	163
Приложение 3.....	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В рамках реализуемого государством курса на всестороннее ресурсосбережение стеновые материалы на основе местного сырья приобретают особое значение. Легкий бетон с заполнителем из растительного сырья является одним из наиболее распространенных видов бетона в регионах с жарким и сухим континентальным климатом. Он обладает высокими теплоизоляционными свойствами, экологически чист, легок и может включать растительную биомассу. Одним из таких материалов может выступать вторичное сырье производства кукурузы — стержни кукурузных початков, которые в значительном количестве образуются на предприятиях по переработке кукурузы. Известен положительный опыт использования шлакощелочного вяжущего для нейтрализации водорастворимых веществ в растительном заполнителе. Такое вяжущее содержит высокореакционные структурные элементы, способствующие повышению физико-механических и конструктивно-технических свойств легких бетонных композитов на основе целлюлозо-органических наполнителей.

В этой связи исследование химических, физических и физико-механических свойств стержней кукурузных початков, их влияния на свойства бетонной смеси, а также подбор вяжущего и специальных добавок для получения состава шлакощелочного легкого бетона является актуальным.

Работа выполнена в рамках Стратегии развития строительной отрасли Российской Федерации до 2030 года и договоров об учебном и научно-техническом сотрудничестве с Актюбинским университетом имени С. Баишева и Актюбинским региональным государственным университетом имени К. Жубанова.

Степень разработанности темы исследования. Основной объем исследований по технологии производства лёгких бетонов с использованием органических заполнителей затрагивает вопросы нейтрализации

водорастворимых веществ, содержащихся в растительном компоненте, проблемы адгезии природных волокон к цементному камню, а также сложности формирования плотной структуры материала.

В научных работах Б. Р. Исакулова, П. И. Боженова, Ю. А. Соколовой, А. В. Волженского, М. Д. Джумабаева, В. Д. Глуховского, А. А. Тулаганова, С. В. Федосова, Ю. П. Горлова, К. Э. Горяйнова, К. А. Бисенова, Л. А. Малининой, Г. П. Чеблыкина, Е. Н. Малинского, А. Т. Баранова, Г. П. Сахарова, В. И. Логаниной, К. Д. Некрасова, М. Ф. Чебукова, Г. В. Румына, Н. Я. Спивака, П. П. Будникова, В. Н. Сокова, Ю. М. Баженова, А. М. Сергеева, М. В. Балахнина, Н. А. Попова, А. А. Акчабаева, Г. И. Горчакова, Г. А. Батырбаева, А. Е. Галибина, И. К. Касимова, Б. Н. Виноградов, А. П. Меркина, И. А. Рыбьева, Ю. С. Бурова, Р. Б. Сироткина, В. М. Хрулева, В. И. Савина, А. С. Щербакова, И. Х. Наназашвили и др. показано, что растительные и промышленные побочные продукты (льняная костра, рисовая шелуха, древесная щепа, торф, шелуха подсолнечника и др.) успешно применяются при производстве лёгких бетонов, повышая их экологическую и экономическую эффективность.

Вместе с тем применение стержней кукурузных початков как органического заполнителя остаётся недостаточно исследованным. Особенно актуальны задачи подбора оптимального состава шлакощелочного вяжущего, эффективных модифицирующих добавок, а также изучение физико-механических характеристик полученного материала. Разработка технологии производства лёгких бетонов с использованием стержней кукурузных початков представляет собой перспективное направление, учитывая ежегодное образование больших объёмов данного биомассового сырья в сельском хозяйстве.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение шлакощелочного лёгкого бетона с использованием вторичного сырья производства кукурузы (стержней кукурузных початков), с улучшенной адгезией заполнителя к вяжущему

камню, для производства изделий, применяемых в малоэтажном строительстве.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

- обоснование эффективности использования вторичного сырья производства кукурузы (стержней кукурузных початков) для производства лёгких бетонов, включающее исследование влияния водорастворимых веществ на адгезию вяжущего к органическому заполнителю, анализ свойств бетонной смеси и подбор вяжущего со специальными добавками;
- исследование влияния водорастворимых веществ вторичного сырья производства кукурузы (стержней кукурузных початков) на адгезию к вяжущему камню, подбор вяжущего и специальных добавок;
- определение технологических особенностей изготовления шлакощелочных лёгких бетонов с использованием органического заполнителя на основе вторичного сырья производства кукурузы;
- изучение влияния гранулометрического состава, типа и формы органического заполнителя из вторичного сырья производства кукурузы на свойства лёгкого бетона;
- подбор состава шлакощелочного лёгкого бетона с заполнителем на основе вторичного сырья производства кукурузы с помощью методов математического моделирования и исследование его физических и физико-механических свойств;
- разработка технологических приёмов получения шлакощелочного лёгкого бетона с использованием органического заполнителя на основе вторичного сырья производства кукурузы и анализ их технико-экономической эффективности.

Научная гипотеза заключается в том, что возможно повышение адгезионных, физических и физико-механических характеристик лёгкого бетона на растительной основе за счёт нейтрализации водорастворимых простых сахаридов, содержащихся в ядре кукурузного початка. Это достигается путём предварительной щелочной обработки органического

заполнителя, а также использованием шлакощелочного вяжущего, обладающего высокой реакционной способностью, что способствует улучшенному сцеплению между растительными волокнами и цементной матрицей. Реализация данной гипотезы позволяет получить лёгкий бетон с повышенной прочностью, стабильностью структуры и долговечностью, пригодный для теплоизоляционно-конструкционных применений.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение лёгкого бетона на основе шлакощелочного вяжущего и растительного заполнителя, полученного из производственных стержней кукурузных початков, с повышенной адгезионной прочностью к шлакощелочному камню бетона. Экспериментально установлено, что предварительная обработка органического растительного сырья щелочным раствором для удаления гидролизуемых и водорастворимых веществ повышает прочность лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков.

Введение в композиционное вяжущее специальных добавок, таких как содосульфатная смесь, фосфорный шлак, зола-унос, способствует нейтрализации водорастворимых органических веществ и повышает его прочность до 2,7–5,1 МПа. Выявлены закономерности взаимодействия шлакощелочного вяжущего как с шлаком, так и с целлюлозными компонентами, что обеспечивает оптимальную макроструктуру и высокую прочность бетона. Методом рентгенографического анализа установлено, что такие добавки к шлакощелочному вяжущему интенсифицируют процесс его гидратации. Установлено, что стержни кукурузных початков, содержащие меньше растворимых сахаров, более перспективны для производства легких бетонов по сравнению с древесным заполнителем (фибrolитом). Определена зависимость кинетики твердения лёгкого бетона от состава и характеристик органических наполнителей.

Предложены рецептурные и технологические параметры получения бетонного композита. С помощью методов регрессионного анализа

определено содержание компонентов в составе лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков плотностью 600–650 кг/м³. Сформулированы теоретические основы получения лёгких бетонов на основе растительного заполнителя, раскрывающие влияние термических процессов на кинетику их твердения, физические и физико-механические свойства.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о влиянии щелочной среды вяжущих на их адгезионную прочность к целлюлозной основе волокнистых материалов природного происхождения. Обоснована эффективность использования шлакощелочного вяжущего в составе лёгкого бетона с заполнителем из вторичного сырья производства кукурузы, обеспечивающего повышенную адгезию вяжущего к целлюлозной основе. Обоснована предварительная обработка кукурузного остатка щелочным раствором, обеспечивающая нейтрализацию водорастворимых веществ и формирование развитой морфологии заполнителя.

Обоснована методология выбора сырья в качестве органического наполнителя в лёгких бетонах, заключающаяся в подборе гранулометрического состава, видов и формы заполнителя при измельчении для получения шлакощелочных лёгких бетонов на основе вторичного сырья производства кукурузы.

Предложено совершенствование технологической линии по производству лёгких бетонов на растительном заполнителе, которая включает дробление, помол, подготовку заполнителя, приготовление смеси, укладку, уплотнение и тепловую обработку при 80 °С для получения бетона класса прочности В5 при марке по плотности D600.

На Актюбинском предприятии создана опытная партия блоков шлакощелочного лёгкого бетона на основе вторичного сырья производства кукурузы, которая легла в основу малоэтажного здания. Экономический эффект по сравнению с растительного сырья других видов составил 679 000 руб.

Методология и методы исследования

Методологической основой работы являлись результаты фундаментальных и прикладных исследований, проведённых отечественными и зарубежными учёными в области получения лёгких бетонов на основе растительного заполнителя. Для изучения вяжущих и смесей на их основе применён комплекс методов исследования с использованием современного высокотехнологичного оборудования, получены обоснованные и достоверные результаты. Исследования основаны на методах, включающих рентгенографический и дериватографический анализы. Характеристики готовых образцов лёгкого бетона определялись согласно нормативным документам.

Положения, выносимые на защиту:

- Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение лёгкого бетона с заполнителем из вторичного сырья производства кукурузы с повышенной адгезией заполнителя к камню бетона высокоорганизованной структуры за счёт регулирования содержания шлакощелочных вяжущих, предварительной обработки заполнителя раствором щелочи и тепловой обработки;
- Влияние водорастворимых веществ, содержащихся в стержнях кукурузных початков, на свойства камня шлакощелочного вяжущего и лёгкого бетона, зависимость кинетики твердения лёгкого бетона от состава и характеристик органических наполнителей;
- Принципы оптимизации гранулометрического состава заполнителя при измельчении для получения шлакощелочных лёгких бетонов на основе вторичного сырья производства кукурузы;
- Рациональные составы и рецептуры шлакощелочного лёгкого бетона на основе измельчённых стержней кукурузных початков, полученные методом математического планирования и экспериментально подтверждённые;

- Влияние органических и неорганических компонентов лёгкого шлакобетона на его микроструктуру, физические и физико-механические свойства, а также результаты их апробации.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается подтверждением теоретических положений результатами экспериментальных исследований шлакощелочного лёгкого бетона с заполнителем из вторичного сырья производства кукурузы, выполненных с использованием различных методов и требований нормативно-технической документации, в том числе зарубежной, с применением современного наукоёмкого оборудования и апробацией результатов в полупромышленных условиях. Результаты исследований не противоречат общепринятым научным фактам и данным, представленным в работах других авторов.

Апробация результатов исследований. Основное содержание и результаты диссертации автора представлены и обсуждены на следующих международных научно-практических конференциях: II Международной научно-практической конференции Казахско-русского международного университета (Актобе, 2015); «Актуальные проблемы архитектуры и строительства» (Благовещенск, 2014); XVIII Международном научно-практическом форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоёмкие технологии и материалы» (SMARTEX-2015) (Иваново, 2015); Международной научно-практической конференции (Белгород, 2018); Международной научно-практической конференции «Инновации в производстве и подготовке технических кадров» АРУ им. К. Жубанова (Актобе, 2020); II Международной научно-практической конференции Каракалпакского государственного университета (Нукус, 2021).

Внедрение результатов исследований. Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась на предприятиях по производству строительных материалов ТОО «А.Е.Н.Д.», ТОО «Актюбинский региональный индустриальный технопарк» и ТОО «Стройдеталь».

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению «08.03.01 – Строительство» для бакалавриата и магистратуры в Актюбинский региональный государственный университет им. К. Жубанова (АРГУ) г. Актобе.

Публикации. Основные положения работы изложены в 8 публикациях, в числе которых 4 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 работа в издании, индексируемом в базе данных Scopus.

Личный вклад. Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение легкого шлакощелочного бетона с заполнителем из вторичного сырья производства кукурузы, соответствующего нормативным требованиям. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Содержит 165 страниц машинописного текста, включающего 42 таблицы, 37 рисунков, список литературы из 126 источников и приложения.

Диссертация выполнена на кафедре «Архитектура и урбанистика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» по научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия и соответствует следующим направлениям исследований паспорта специальности:

п. 1. Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств, в том числе специальных и экологически чистых.

п.3. Разработка научно обоснованных способов управления структурообразованием строительных материалов, основанных на регулировании процессов, вынужденно возникающих при совмещении отдельных компонентов, и самопроизвольно протекающих процессов самоорганизации, в том числе методами компьютерного проектирования..

п.6. Научное обоснование и разработка высокопрочных, экологически безопасных, биопозитивных, энергоэффективных, природоподобных строительных материалов, обеспечивающих строительство зданий и сооружений различного назначения, в том числе быстровозводимых и легко трансформируемых.

Автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук **Б.Р. Исакулову** за помощь и научные консультации при написании данной работы.

Глава 1. Аналитический обзор теоретических исследований о физико-химическом составе стержней кукурузных початков и их возможности использования для производства лёгких бетонов

Строительство в Казахстане, как важная отрасль народного хозяйства, занимает одно из первых мест по использованию материальных ресурсов. Основная цель современного строительства заключается в постановке задач экономичного и рационального использования этих ресурсов за счёт переработки существующего вторичного сырья [9, 13, 46, 52, 53]. Решение данных проблем приведёт, во-первых, к экономии дорогостоящих материальных ресурсов и, во-вторых, к снижению их завоза из других регионов. В этой области известны работы и исследования многих учёных стран СНГ и др. [18, 32, 58, 82, 110]

В последнее время внимание исследователей привлекает проблема получения эффективных композитов, структурными элементами которых являются неорганические вяжущие и целлюлозоорганические наполнители [3, 8, 25]. Такими наполнителями могут служить широко распространённые древесные остатки и различное сельскохозяйственное вторсырьё [4, 61, 66]. Исследования в этой области включают разработку и изучение лёгких бетонных материалов с использованием растительной биомассы.

В результате появилась возможность определить характеристики формирования структуры таких материалов, наметить методы их улучшения и определить области применения.

Поскольку органические заполнители и неорганические вяжущие вещества антагонистичны, использование портландцемента усложняет процесс производства лёгкого бетона из-за присутствия в заполнителях водорастворимых экстрактивных веществ, называемых «цементными ядами» [47, 101, 115].

Весомый вклад в разработку и изучение шлакощелочных вяжущих и композиционных материалов на их основе в условиях Центральной Азии и Казахстана внесли учёные [38, 46, 52, 68, 82, 108, 112].

В современных условиях важно, чтобы региональные вяжущие вещества и материалы, изготовленные на их основе, отвечали высоким техническим требованиям и решали задачу обеспечения ресурсами, способствующими защите окружающей среды в каждом регионе.

Из-за нехватки древесины и сырья в регионах Казахстана растительная биомасса сельского хозяйства может служить органоцеллюлозным наполнителем при производстве лёгких бетонов.

Вопросам разработки и исследования легкого бетона на основе сельскохозяйственного вторичного сырья посвящены работы, которые показали перспективность применения данных материалов при получении легкого бетона.

Это исследование включает изучение водорастворимых восстановителей для растительных компонентов, исследование свойств различных гидравлических вяжущих, а также шлакощелочных лёгких бетонов с использованием местных промышленных побочных продуктов на основе фосфатного шлака, смеси сульфата натрия, низкокальцевой золы и измельчённых кукурузных початков [13, 38, 46, 53, 60, 66, 95, 109, 126].

1.1. Общие сведения о лёгких бетонах на основе целлюлозных органических наполнителей

Лёгкий бетон на основе целлюлозных наполнителей относится к группе лёгких бетонов с ячеистой и волокнистой структурой, основными компонентами которых являются частицы целлюлозных наполнителей растительного происхождения и различные неорганические вяжущие вещества. Также используются арболит, фибробетон и опилкобетон [25, 42, 43, 87].

Связывание между частицами целлюлозного наполнителя может быть обеспечено с помощью растворов различных химических добавок, смешанных с неорганическими вяжущими в водной среде, а затем нанесённых на неровности, трещины и поры в различных цементных растворах (вяжущих) [47, 115].

Затвердевание цементного клея через некоторое время связывает частицы органического целлюлозного заполнителя с цементным камнем. Величина связи между цементным камнем и целлюлозным заполнителем является основным фактором, определяющим физико-механические свойства и качество изготовления бетона с лёгким целлюлозным заполнителем [22, 28, 47, 61, 93].

Плотность, теплопроводность и хрупкость снижаются, а тепловые, санитарные и эксплуатационные характеристики улучшаются благодаря лёгким пористым частицам органических наполнителей растительного происхождения. Материал можно измельчать, резать и обрабатывать различными ручными инструментами [25, 42, 105, 123, 125].

Минеральные вяжущие вещества придают такие свойства, как прочность при сжатии и изгибе, биологическую устойчивость и огнестойкость лёгкому бетону, изготовленному с использованием целлюлозного заполнителя, повышая долговечность материала [25, 42, 69, 74, 102].

Физико-механические свойства и структура лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей определяются показателями прочности на разрыв, формой и пределами прочности волокон из частиц органического заполнителя и вяжущего вещества, водорастворимыми экстрактивными веществами, препятствующими твердению и отвердеванию волокон, степенью их насыщения и усадкой в воде, а также удобством обслуживания и мобильностью [25, 47, 74, 88, 93, 101, 102, 115].

1.2. Физико-механические свойства лёгкого бетона на основе целлюлозных органических заполнителей

В зависимости от назначения строительства и вида органического заполнителя лёгкие бетоны подразделяются на следующие марки:

- М10–М15 — для изоляционных изделий;
- М25–М35 — для конструкций.

Цифры, обозначающие марку лёгкого бетона на основе целлюлозоорганического заполнителя, соответствуют прочности при сжатии (МПа) контрольных кубов размерами 10×10×10 см и 15×15×15 см, затвердевших при температуре 18–25 °С и относительной влажности 60–80 %, и испытанных через 28 суток в условиях естественной влажности [42, 102].

Прочность при сжатии лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей зависит от влажности материала и может изменяться в диапазоне от 0 до 60 % [28, 31].

Наибольшей прочностью обладают лёгкие бетоны на основе целлюлозоорганического заполнителя с равновесной влажностью 16–18 %, а наименьшей — полностью высушенные образцы лёгких бетонов, а также материалы с влажностью более 70 % [31].

Это связано с тем, что кусочки целлюлозоорганических наполнителей, входящие в состав лёгких бетонов, при высыхании усаживаются в среднем на 12–15 % по объёму при снижении влажности от 30 % до 0 %. В результате затрудняется адгезия органических наполнителей к цементному камню. Увеличение содержания воды в лёгких бетонах на основе целлюлозоорганических заполнителей также приводит к снижению прочности за счёт набухания частиц и фрагментов целлюлозоорганических наполнителей и их слабой ассоциации с затвердевшим цементным камнем [28, 31, 47].

Прочностные свойства лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей обратно пропорциональны

количественному содержанию коры и опилок в составе наполнителей. Поэтому увеличение содержания коры и опилок (до 20 %) в составе заполнителя снижает прочность лёгких бетонов до 40–50 % [3, 101, 115].

Лёгкие бетоны на основе целлюлозоорганических заполнителей обладают повышенной ударопрочностью, что делает их более транспортабельными по сравнению с другими видами лёгких ячеистых бетонов, даже в неблагоприятных дорожных условиях [22, 25, 89, 102].

Для фактурных изделий и конструкций из лёгкого бетона с целлюлозными заполнителями прочность цементно-песчаного раствора (соотношение цемент: песок = 1:3) через 28 суток твердения в условиях естественной влажности составляет 15–16 МПа. Плотность такого бетона находится в пределах 600–850 кг/м³. Прочность на растяжение лёгкого бетона с целлюлозным заполнителем в свежем растворе, смешанном с цементом и песком, после попеременного замораживания и оттаивания составляет 1,4–1,8 МПа и соответствует требованиям СН 277-80 «Инструкция по изготовлению изделий из целлюлозного бетона» [42, 102].

Зависимость прочности от плотности лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей, изготовленных с использованием различных видов наполнителей, приведена в таблице 1.1 [18, 31, 46, 61, 95].

Средний модуль упругости составляет от 400 до 1200 МПа, коэффициент Пуассона — от 0,15 до 0,2. В зависимости от формы поверхности арматуры (гладкая или рифлёная) и типа защитного покрытия величина адгезии лёгкого бетона с целлюлозным наполнителем к металлической арматуре на 7-е сутки составляет 0,1–0,3 МПа [25, 61, 89, 102].

Водопоглощение лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей, незащищённых покрытием, составляет в среднем 60 % по массе. Скорость водопоглощения лёгкого бетона, состоящего преимущественно из органического заполнителя на основе целлюлозы, можно снизить путём нанесения на поверхность различных гидрофобных плёнок и красок [25, 42, 73, 102].

Таблица 1.1 — Прочность сухого лёгкого бетона на основе целлюлозоорганических заполнителей

№ п/п	Марка легкого бетона на основе целлюлозных органических заполнителей, МПа	На костре конопли, кг/м ³	На стеблях хлопчатника, кг/м ³	На стержнях кукурузных початков кг/м ³	На древесной дробленке, кг/м ³
1	M10	470-500	450-480	450-470	700
2	M15	500-530	480-500	470-500	750
3	M20	530-570	500-550	500-550	800
4	M25	570-620	550-600	550-570	850
5	M35	620-650	600-630	570-600	900

Показатель морозостойкости изделий из лёгкого бетона с целлюлозными заполнителями зависит от их прочности, а также от раствора или бетона наружного отделочного слоя:

- для конструкционных и изоляционных изделий, используемых в зданиях с внутренней относительной влажностью менее 60 %, — не менее 25 циклов;
- при относительной влажности от 60 % до 70 % — не менее 35 циклов;
- для наружных отделочных слоёв из раствора или бетона — не менее 50 циклов [42, 102].

Показатель смачиваемости лёгкого бетона на основе целлюлозоорганического заполнителя, изготовленного с использованием различных вяжущих, зависит от его плотности, типа целлюлозного заполнителя и применяемого минерализатора [23, 48, 73, 74].

При температуре воздуха 20 °С и относительной влажности 40–90 % содержание поглощённой воды составляет 4,5–12 % от массы сухого вещества. Лёгкий бетон на основе целлюлозоорганических заполнителей имеет среднюю величину усадки при высыхании 0,5 %, что соответствует 5 мм на 1 м изделия. В связи с повышенной усадкой изделия из лёгких бетонов

на основе целлюлозоорганических заполнителей перед монтажом строительных конструкций должны иметь минимальную влажность. Поскольку коэффициент набухания целлюлозного лёгкого бетона по отношению к воде составляет от 0,25 % до 2 %, такой бетон требует поверхностной гидроизоляции во влажных помещениях [25, 28, 42, 73, 102].

В зависимости от средней плотности материала тепловые свойства лёгких бетонов на основе органических целлюлозных заполнителей составляют от 1710 до 1050 Дж/(кг•°С) в сухом состоянии. Тепловые свойства лёгкого бетона с целлюлозным заполнителем зависят от его плотности, типа органического наполнителя, характера расположения волокон и частиц, количества вяжущего и пористости материала. Удельная теплота сгорания лёгкого бетона с органическими целлюлозными заполнителями в 2–3 раза выше, чем у других минеральных материалов. Коэффициент теплопоглощения и, вследствие этого, теплоинерционные свойства лёгких бетонов на основе органических заполнителей почти вдвое выше, чем у бетонов с неорганическими компонентами. В районах с холодным климатом, где используются нерегулируемые автономные системы отопления, коэффициент теплопоглощения может иметь важное значение для поддержания стабильного теплового режима внутри объекта [70, 103, 105, 123, 125].

В таблице 1.2 приведены показатели теплопроводности лёгких бетонов на основе различных органических заполнителей в зависимости от их плотности [25, 42, 70, 95, 123, 125].

Качественно изготовленные лёгкобетонные конструкции на основе целлюлозных органических заполнителей для несущих и ограждающих конструкций стен гражданских зданий полностью удовлетворяют требованиям по теплозащите и теплоустойчивости [42, 102, 103].

Таблица 1.2 — Показатели коэффициента теплопроводности лёгких бетонов с различными органическими заполнителями

№ п/п	Вид легкого бетона	Плотность, кг/м ³	Средняя массовая влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м,°С)
1	На древесной дробленке	620 - 720	6,2-12,4	0,11-0,20
2	На измельченных стеблях хлопчатника	590-700	8,1 - 12,7	0,13-0,22
3	На рисовой лузге	600 - 670	9,4-16,0	0,12-0,26
4	На стержнях кукурузных початков	540 - 650	7,8-9,2	0,08-0,19

Лёгкие бетоны на основе целлюлозоорганических заполнителей наиболее устойчивы к микробной коррозии. Это связано с тем, что органические заполнители целлюлозы обрабатываются различными химическими добавками, которые одновременно выступают в роли консервантов, а волокна целлюлозы и сами частицы покрываются слоем затвердевшего цементного клея [25, 47, 115].

По степени биологической устойчивости лёгкие бетоны на основе целлюлозоорганических заполнителей относятся к V группе и обеспечивают достаточную долговечность зданий. Стойкость к поражению микрофлорой и химическими веществами в агрессивных средах позволяет использовать лёгкие бетоны на основе целлюлозоорганических заполнителей для несущих и герметизирующих конструкций стен промышленных и гражданских зданий [25, 102].

Предел огнестойкости панелей из лёгкого бетона толщиной 200 мм с плотностью целлюлозного заполнителя 500–550 кг/м³ находится в пределах 0,75 ч [25, 109, 102]

Фактическая плотность лёгкого бетона, производимого и применяемого на основе органических целлюлозных заполнителей, составляет 620–650 кг/м³,

а его огнестойкость достигает 1,5 ч при толщине 250 мм, оштукатуренного цементно-песчаным раствором [25, 42, 109].

1.3. Возможности и сырьевая база России и Казахстана по производству шлакощелочных лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей

Поскольку потребность в эффективных и недорогих строительных материалах с каждым днём возрастает в связи с расширением жилищного строительства в регионах Республики Казахстан, создание конструкционных и теплоизоляционных материалов с использованием вторичных ресурсов будет способствовать развитию её экономики [9, 13, 46, 53, 82].

Легкие бетоны, изготовленные с применением органического вторичного сырья, особенно актуальны для регионов Казахстана с резкоконтинентальным климатом, поскольку отличаются малым весом, достаточной прочностью, экологичностью и высоким уровнем теплоизоляции. В качестве наполнителей в таких смесях могут использоваться растительные остатки, широко распространенные в западных и южных областях страны. Кроме того, Казахстан обладает значительными объемами техногенного сырья — побочных продуктов металлургической, нефтехимической, горнодобывающей и топливно-энергетической отраслей. Эти материалы, такие как доменные и ферросплавные шлаки, золошлаковые смеси, шламы бурения и продукты переработки нефти, применяются как минеральные добавки или заполнители, улучшая структуру бетона, снижая его плотность, повышая стойкость к агрессивным средам и одновременно уменьшая нагрузку на полигоны промышленных предприятий [13, 46, 53, 55, 94, 99].

Лёгкий бетон на основе целлюлозоорганических заполнителей по своим физико-механическим и строительно-техническим свойствам является одним из лучших теплоизоляционных и конструкционных стеновых материалов. Однако растущие требования к качеству лёгкого бетона на основе

растительного сырья поставили задачу дальнейшего совершенствования его структуры и технических параметров [8, 25, 32, 74].

Использование промышленных побочных продуктов в качестве шлакощелочного вяжущего должно привести к улучшению физико-механических и конструктивно-технических свойств лёгких бетонных композитов с целлюлозными материалами, так как они обладают высокой активностью и способствуют образованию структурообразующих элементов [38, 52, 55, 68, 112].

Также известно, что порошкообразные добавки в виде отработанного шлака могут влиять на прочность бетона. Однако механизм влияния добавок на структуру и свойства композитных вяжущих до конца не выяснен, а рациональная рецептура и метод приготовления или производства лёгкого бетона не разработаны [40, 45, 74, 83].

В регионах Казахстана на полигонах аккумулировано более 70 млн т отработанного алюмосиликатного сырья, при ежегодном образовании около 20 млн т, щелочных компонентов — около 25 000 т, алюмосиликатного сырья — 2,2 млн т. К ним относятся шлаки, золы и другие виды техногенных образований, более 15 000 т щелочных компонентов, около 15 млн т остатков серы и более 25 000 т хромсодержащих шламов. В таблице 1.3 приведено наличие промышленного вторичного сырья для производства безобжигового цемента и различных материалов в регионах Казахстана [13, 53, 55, 82].

В районах Казахстана, где отсутствует достаточное количество древесной щепы и пористых заполнителей, производство изделий из лёгкого бетона с её использованием невозможно организовать в масштабах, необходимых для дальнейшего развития производства строительных материалов [18, 46, 53, 82].

На территории Республики Казахстан возможно применение побочных продуктов сельскохозяйственного и агропромышленного комплекса (стержни кукурузных початков, стебли хлопка, кенафная и конопляная костра, рисовая шелуха и солома) в качестве органических заполнителей для получения лёгких

бетонов-утеплителей, теплоизоляционных и строительных материалов, изделий и конструкций [18, 44, 46, 53, 61, 95, 123].

Таблица 1.3 — Наличие сырья в регионах Казахстана для производства шлакощелочных лёгких бетонов

№	Наименование минерального вторичного сырья промышленности	Запасы или объем в отвалах, тыс. т	Ежегодный прирост, тыс. т
1	Доменный гранулированный шлак	11500	2150
2	Гранулированный ЭТФ шлак	16240	4080
3	Шлаки цветной металлургии	37400	1000
4	Шлаки сталеплавильные, ферросплавного производства, производства монокромата натрия и сернистого натрия		
5	Золы и шлаки ТЭС	15740	854
6	Жидкое стекло	160300	12200
7	Содосульфатная смесь	1500	230
8	Остаточная сера извлеченной нефти	2000	220
9	Хромосодержащий шлам	15 млн	1000
10	Бокситовый шлам	25000	900
		15000	900

В кукурузосеющих регионах Казахстана (Алматинская, Талдыкорганская, Туркестанская, Жамбылская, Актюбинская области) ежегодно подлежит утилизации около 10 млн т стержней кукурузных початков. Часть из них используется местным населением как топливо, часть сжигается, загрязняя атмосферу, а другая часть запахивается в почву. Наличие сырьевой базы и побочных продуктов агропромышленного комплекса в регионах Казахстана для производства легкобетонных материалов приведено в таблице 1.4. [46, 53, 95, 109].

Таблица 1.4 – Наличие растительного сырья в регионах Казахстана для производства легкобетонных материалов

№	Наименование минеральных побочных продуктов агропромышленности и сельского хозяйства	Запасы или объем в отвалах, тыс. т	Ежегодный прирост, тыс. т
1	Стержни кукурузных початков	-	8000
2	Стебли хлопчатника	-	6000
3	Рисовая солома	-	190
4	Лузга и шелуха риса	-	110
5	Костра кенафа и конопли	-	31

Анализируя проведённые исследования предшественников и данные государственного статистического управления Казахстана, установлено, что утилизация 1 тыс. м³ стержней кукурузных початков позволит изготовить более 1 тыс. м³ лёгкого бетона и ежегодно сэкономить более 1 тыс. м³ дефицитных пористых заполнителей, 120 т условного топлива и 1,5 тыс. м³ деловой древесины. Решив вышеперечисленные вопросы, можно расширить сырьевую базу и внести вклад в решение экологических проблем [9, 31, 95].

1.4. Направления разработки и улучшения свойств композиционных материалов на целлюлозных заполнителях растительного происхождения

Спрос на малоэтажные здания в Республике Казахстан растёт, потребность в строительных материалах увеличивается с каждым днём, и одним из путей решения этой проблемы является создание высокоэффективных материалов и конструкций различного назначения на основе местных ресурсов и побочных продуктов производства.

В этой связи наиболее перспективной представляется разработка строительных и изоляционных материалов с использованием вторичного сырья [29, 46, 53, 82].

К таким материалам относятся лёгкие бетоны на основе растительного сырья, технология которых позволяет с высокой эффективностью применять растительное сырьё деревообрабатывающего и сельскохозяйственного производства и одновременно решать проблему защиты окружающей среды [46, 53, 66, 85].

Основной областью применения лёгких бетонных материалов на основе целлюлозоорганических заполнителей является малоэтажное строительство, где они используются в качестве стеновых покрытий в виде небольших блоков и панелей. Они также применяются в высотных зданиях в качестве материала для перегородок, стеновых панелей навеса и даже плит перекрытий для лёгких нагрузок [25, 42, 89, 102].

Широкое применение лёгких бетонных материалов на основе целлюлозоорганических заполнителей обусловлено их многими превосходными свойствами. Это один из самых лёгких строительных материалов: плотность теплоизоляционного бетона составляет менее 400–500 кг/м³, теплопроводность — всего 0,19–0,7 Вт/(м•К), а звукоизоляционная способность — хорошая. Лёгкие бетонные материалы с целлюлозными заполнителями являются одними из лучших стеновых материалов, поскольку они могут поддерживать нормальный микроклимат в помещении, за исключением конденсации влаги на поверхности ограждающих конструкций [25, 42, 125].

На прочность и другие механические свойства лёгких бетонов на основе целлюлозоорганических заполнителей оказывают значительное влияние механические свойства заполнителя, а также физико-химические процессы, происходящие во время образования и затвердевания легкого бетона [28, 47, 74, 83].

Помимо положительных свойств, таких как низкая плотность, хорошая смачиваемость и простота обработки, особенно дробления, древесные заполнители обладают и отрицательным свойством — трудностью получения высокопрочного материала [47, 101, 115].

Исследования показали, что щелочная среда цементных паст способствует выделению древесных экстрагируемых веществ, которые осаждаются на поверхности частиц минералов C_3S и C_3A и тормозят ход процесса гидратации цемента, образуя тончайшую оболочку. Предполагается, что углеводы и танины в древесине являются поверхностно-активными гидрофильными веществами, связанными с цементом [48, 101, 115].

Когда эти вещества вводятся в цементную систему с водой, они адсорбируются и под влиянием молекулярной когезии ориентируются вокруг гранул цемента, образуя тонкий слой — адсорбционный слой [48].

Частицы цемента, покрытые этим «защитным слоем», теряют способность прилипать друг к другу под действием молекулярных сил, но образующиеся слои остаются неповреждёнными, вода может получить доступ к частицам цемента внутренних слоев, удалить продукты гидратации цемента и ингибировать гидролиз и гидратацию, в то время как определённая концентрация углеводов останавливает их [48, 101, 115].

Однако разработке, применению и промышленному освоению производства лёгких бетонных материалов на основе целлюлозоорганических заполнителей в республике пока уделяется мало внимания.

Исследования, посвящённые изучению аспектов этой проблемы, носили характер эпизодических лабораторных работ и не нашли широкого практического применения. Ресурсы хлопковых стеблей, рисовой соломы и шелухи, костров кенафа и кукурузных початков значительно уступают по качеству традиционно используемым органическим наполнителям. Для промышленного производства лёгких бетонов с такими заполнителями требовалась либо высокая стоимость качественного портландцемента, либо возникали серьёзные проблемы в организации технологии его производства [18, 46, 53, 66].

В работах [18, 19, 21, 61] показана возможность использования измельчённых стеблей хлопчатника в качестве наполнителя в лёгком бетоне. Авторы исследовали основные физико-механические свойства

портландцементных бетонов с заполнителем в виде хлопковых стеблей, а именно плотность, прочность при сжатии, а также предложили технологию их изготовления. Однако предлагаемая технология требует наличия обширного прессового оборудования, а для производства крупных изделий необходимы большие прессы.

В работах [67, 61] предложено предварительно замачивать измельчённые стебли хлопка в воде с температурой 333 К. В этом случае арболитовая прочность стеблей хлопка остаётся ниже, чем у древесной стружки. Также известны исследования по лёгким бетонам с использованием костры кенафа, конопли и льна.

Важной характеристикой данного растительного сырья является то, что оно не оказывает такого же негативного воздействия на цемент, как остатки переработки хвойных пород. Это объясняется тем, что лигнинные волокна отделяются от древесины путём специальной обработки перед переработкой. Всё, что требуется для такой подготовки, — это вымачивание в течение 20–30 дней в естественном водоёме или яме, заполненной водой, либо в специальном бассейне с тёплой водой с перерабатывающего завода. Поэтому исследователи утверждают, что при производстве лёгкого бетона из льняной костры нет необходимости предварительно пропитывать её химическими добавками [53, 101].

Известно, что органические материалы также могут использоваться в качестве заполнителей в шлакощелочных вяжущих композициях. Шлакощелочные вяжущие характеризуются тем, что щелочной компонент взаимодействует не только со шлаком, но и с заполнителями, которые становятся более реактивными в сочетании с этим вяжущим [38, 52, 68, 112].

Для получения шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков рекомендуется применять тепловую обработку, которая, как утверждают, приводит к сокращению длительности цикла отверждения изделий в 7–8 раз [95, 109].

Исследователями [95, 109, 112] предложены составы и технология изготовления шлакощелочных лёгкобетонных материалов на основе стержней кукурузных початков с виброштампованием.

Для их изготовления мелкоизмельчённый фосфорный шлак смешивают с измельчёнными стержнями кукурузных початков или рисовой шелухой и водным раствором жидкого стекла. Образцы формовали с использованием матрицы и закрытых форм. Отверждение образцов проводили при температуре от 291 до 293 К. Полученный материал имел предел прочности 2,1–3,2 МПа [55, 60, 95].

Установлено, что замена портландцемента шлакощелочным вяжущим позволяет исключить из технологии операции замачивания заполнителей, так как соединения, отрицательно влияющие на повышение прочности лёгкого бетона, не образуются в процессе твердения системы «шлакощелочное вяжущее — органический заполнитель». Кроме того, исключено применение химических добавок для лёгких бетонов на основе портландцемента: минерализующих агентов и ускорителей [52, 68, 112].

Исследования, направленные на разработку и изучение органоминеральных композитов на основе щелочных вяжущих и сельскохозяйственного вторичного сырья [46, 52, 55, 68, 82, 95, 109, 112], представляют большой научный и практический интерес.

В исследовании [56] на основе измельчённых стеблей хлопка был получен шлакощелочной арболит прочностью 4,0 МПа. Следует отметить, что эти исследования носят предварительный характер и требуют дальнейшего развития.

При участии авторов [52, 95, 109, 112] были проведены работы, показавшие возможность получения эффективных строительных материалов на основе шлакощелочных вяжущих и побочных продуктов агропроизводства. Предлагалось ускорить закалку путём термообработки до 80 °С.

Исследование, проведённое авторами [95, 109, 112], было направлено на производство лёгкого бетона для конструкционного применения.

Оптимальное содержание шлака в разработанном составе находилось в диапазоне 450–500 кг/м³, щелочных компонентов с плотностью 1250–1300 кг/м³ и 300–360 л/м³, а также органических заполнителей 100–140 кг/м³. Давление сжатия при уплотнении смеси составляет 0,2–0,4 МПа. Авторы также рекомендуют тепловую обработку путём изотермического твердения при температуре 353 К. Представляет интерес изучение введения песчаных добавок для изменения состава лёгкого бетона и корректировки его свойств.

Особенностью лёгких бетонов на основе органических заполнителей является их структура, поэтому для создания теплоизоляции (плотность менее 500 кг/м³) следует учитывать и этот фактор. Высокое водопоглощение органических заполнителей несовместимо с применением термической и влажно-термической обработки [25, 42, 123].

Основной задачей при создании шлакощелочных лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков является изучение содержания экстрагируемых веществ, определяющих эксплуатационные характеристики получаемого материала. Приведённых фактов недостаточно для решения задач, связанных с разработкой и исследованием высокоэффективных лёгких бетонов на основе побочных продуктов агропроизводства, особенно теплоизоляционных и изоляционных конструкций [31, 95, 101, 123].

Таким образом, анализ исследований в области органоминеральных композитов на основе заполнителей растительного происхождения показал принципиальную возможность получения шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков. На рисунке 1.1 приведены различные виды легкобетонных композиций на основе растительного сырья и возможности их применения в строительной отрасли Казахстана [31, 46, 53, 95, 109, 123].

Также в таблице 1.5 приведены основные операции, применяемые для ускорения твердения и повышения прочности лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков, а также их недостатки.

Учитывая вышеизложенное, а также основные эксплуатационные характеристики и недостатки, представленные в таблице 1.5, можно сделать вывод, что при приготовлении шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков необходимо учитывать все факторы, влияющие на основные свойства конечного продукта [31, 95, 109].

Работы по установлению возможности применения в качестве заполнителей остатков агропроизводства в виде стержней кукурузных початков, анализ которых приведён выше, не включают исследования, открывающие пути создания теплоизоляционно-конструкционного лёгкого бетона, связанные с изучением экстрактивных веществ растительного сырья и их влияния на свойства вяжущего [31, 95, 109, 101].

Следует отметить, что широкий диапазон оптимизации составов шлакощелочного лёгкого бетона в зависимости от вида заполнителя и технических параметров предопределяет необходимость изучения основных факторов, влияющих на свойства лёгкого бетона, а также проектирования составов последних. Имеющиеся исследования свидетельствуют о технических преимуществах шлакощелочного лёгкого бетона на основе композиционных шлакощелочных вяжущих и измельчённых стержней кукурузных початков [52, 95, 109, 112].

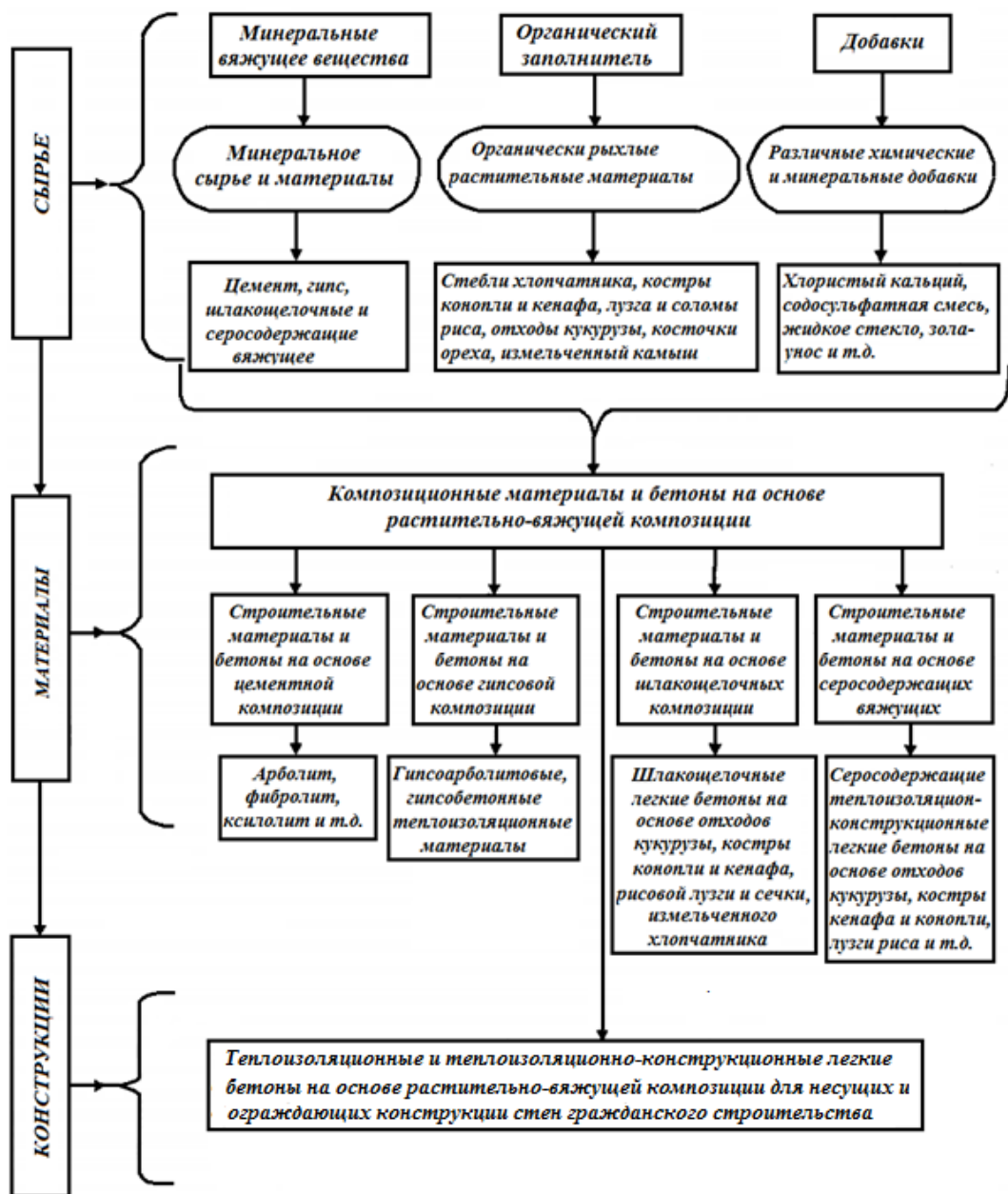


Рисунок 1.1 – Различные виды легкобетонных композиций на основе растительного сырья и возможности их применения в строительной отрасли.

Однако для широкого практического использования вяжущее должно быть изготовлено на основе местного сырья. Решение проблемы производства шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков также тесно связано с проблемой расширения сырьевой базы. С другой стороны, необходимо оценить пригодность местного сырья для получения эффективных шлакощелочных лёгких бетонов с высокими структурно-техническими свойствами [13, 53, 55, 95].

Таблица 1.5 – Перечень технологических операций, приводящих к повышению прочности лёгкого бетона, изготовленного с добавлением стержней кукурузных початков.

Основное содержание операции	Недостатки
1. Предварительное выдерживание (до 3 месяцев) заполнителей на основе стержней кукурузных початков.	1. Потребность в больших площадях складирования органического заполнителя на основе <i>стержней кукурузных початков</i> и высокие трудозатраты.
2. Предварительная обработка заполнителей на основе стержней кукурузных початков различными химическими добавками (хлоридом кальция, сульфатом алюминия, комплексными добавками — хлоридом кальция с известью, хлоридом кальция с жидким стеклом и т. д.).	2. Дороговизна химических добавок, высолообразование в готовых изделиях, коррозия арматуры в армированных конструкциях.
3. Нейтрализация вредных веществ, содержащихся в органическом заполнителе на основе стержней кукурузных початков, химическими добавками.	3. Трудность определения точного количества вредных веществ в составе заполнителя на основе <i>стержней кукурузных початков</i> .
4. Замачивание (промывка) заполнителей на основе стержней кукурузных початков.	4. Удорожание производства изделий.
5. Сушка заполнителей на основе стержней кукурузных початков.	5. Усложнение технологии производства.
6. Применение быстротвердеющих, высокопрочных вяжущих.	6. Потребность в дополнительном специальном оборудовании.
7. Применение тепловой обработки (не более 70 °С) в течение 24 ч и более.	7. Удорожание производства изделий.
	8. Усложнение технологии приготовления смеси, потребность в дополнительном специальном оборудовании.
	9. Относительно низкая прочность готового материала при высоком расходе вяжущих.
	10. Приобретение изделиями только распулбочной прочности, вследствие чего возникает потребность дополнительного выдерживания в тёплом помещении не менее 7 суток в летнее время и более — в зимнее.
	11. Низкая обрачиваемость форм.

Выводы по главе 1

1. Анализ научных работ, посвященных исследованию физико-механических свойств целлюлозосодержащих лёгких бетонов, продемонстрировал их высокие эксплуатационные характеристики (звуко- и теплоизоляция, ударопрочность), низкую плотность, удовлетворительную для использования в строительных конструкциях прочность. Данные о влиянии формы и плотности волокон органических заполнителей на их адгезию к

вяжущему и на срок службы лёгкого бетона демонстрируют возможность применения композитов на основе целлюлозоорганических заполнителей в качестве теплоизоляционного материала при малоэтажном строительстве.

2. Из научных трудов разных исследователей выявлена обратная зависимость показателей прочности лёгкого бетона от влажности и количества органического заполнителя. Данные о влиянии состава воды затворения на сцепление волокон целлюлозосодержащих заполнителей с цементным камнем при гидратации использовались при корректировке составов композитов в этом диссертационном исследовании.

3. Применение шлакощелочных вяжущих в совокупности со стержнями кукурузных початков, кострой и стеблями хлопка ускоряет твердение и способствует набору прочности композита, что способствует повышению эффективности и экологичности производства.

Глава 2. Характеристика исходного сырья, материалов и методы исследования шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков

2.1. Характеристика исходного сырья и материалов

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова (Казахстан) совместно с Ивановским государственным политехническим университетом (РФ).

Также исследования выполнялись в промышленных условиях на заводах железобетонных конструкций и строительных материалов ТОО «Стройдеталь», ТОО «А.Е.Н.Д.», ТОО «Актюбинский инновационный технопарк Актобе», ТОО «Нефтегазстрой».

Одной из целей данной работы является получение вяжущего композита с рядом ключевых свойств, обеспечивающих прочность, долговечность и экономическую эффективность легкого бетона на основе стержней кукурузных початков, обладающего требуемой прочностью на сжатие, теплоизоляционными свойствами, экономичностью, долговечностью, морозостойкостью, огнестойкостью и водостойкостью.

Бетон должен обладать достаточной прочностью, чтобы быть пригодным для использования в строительстве, особенно в малоэтажных зданиях и теплоизоляционных конструкциях. Целевые показатели прочности варьируются в пределах 2,7–4,5 МПа, что соответствует легким бетонам с определенными требованиями к конструкционной и теплоизоляционной прочности.

В данной работе для снижения плотности строительного композита до 600–650 кг/м³ и обеспечения высоких теплоизоляционных характеристик в качестве заполнителя использовались стержни кукурузных початков, при этом уменьшением толщины матрицы снижалось количество вяжущего.

Для применения композита в регионах Казахстана и России с континентальным климатом необходимо обеспечить морозостойкость материала.

Используемый при изготовлении лёгкого бетона гранулированный электролитический шлак получен с Чимкентского производственного объединения «Фосфор». Материал отвечает нормам ГОСТ 3476-2019, СТ РК 935-92 «Электротермический фосфорный гранулированный шлак для производства цемента», а также требованиям ГОСТ 10180-2012.

Шлак использовался в виде порошка в соответствии с ГОСТ 3476–2019, ГОСТ 10180-2012, ОСТ 67-11-84 и измельчался до удельной поверхности 4000–4200 см²/г. В таблице 2.1 приведён химический состав фосфорного шлака.

Таблица 2.1 Химический состав фосфорного шлака

Содержание оксидов в составе фосфорного шлака, масс. %						
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	F	п.п.п.
45,94- 46,56	45,59- 46,32	2,52-3,16	0,96-1,63	0,28-0,57	0,99-1,92	1,13-1,86

Щелочные активаторы. Щелочные активаторы необходимы для активации алюмосиликатных компонентов шлака и золы-уноса.

Компоненты:

1. Натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078–2021). Водорастворимое вещество с щелочной реакцией pH 10–13, плотность 1,47–1,52 г/см³, силикатный модуль 2,31–2,6 для активации шлака.

2. Содосульфатная смесь — смесь кальцинированной соды (ГОСТ 10689–75 «Сода кальцинированная техническая из нефелинового сырья») и сульфата натрия. Регулирует реакционную активность шлака, предотвращает образование трещин и повышает прочность.

Состав и свойства жидкого стекла регламентируются в соответствии с ГОСТ 13078–2021 «Стекло жидкое натриевое. Технические условия». Вещество растворимо в воде, его водный раствор имеет щелочную реакцию (рН 10–13). Массовая доля нерастворимых компонентов не превышает 0,2%. Плотность вещества составляет 1,47–1,52 г/см³. Для производства вяжущих используется жидкое стекло с силикатным модулем 2,31–2,6; для электродного производства – 2,8–3,0. Химический состав содосульфатной смеси приведён в таблице 2.2 [38, 116, 119, 122].

Таблица 2.2. Химический состав содосульфатной смеси

Содержание оксидов в составе содосульфатной смеси, масс. %						
SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SO ₄	NaCl
1-3		40-46			25-40	5-14

В качестве активной минеральной добавки использовалась зола-унос Актюбинской ТЭС, соответствующая современным требованиям по химическому составу, дисперсности и активности, установленным ГОСТ 25592–2019 «Золы и шлаки тепловых электростанций. Технические условия». Использование данной добавки обеспечивало повышение реологических свойств бетонной смеси и активизацию гидратации цемента [26, 45, 73]. Зола-унос Актюбинской электростанции имеет следующие свойства: удельная площадь поверхности — 2550 см²/г; активность поглощения — 32 мг/г; эффективная плотность — 2000 кг/м³; насыпная плотность — 955 кг/м³ [55, 57, 60]. В таблице 2.3 показан химический состав золы-уноса.

Использование золы-уноса позволяет сократить количество портландцемента и получить материал с прочностными характеристиками, аналогичными или даже превосходящими традиционный бетон на портландцементе [17, 45, 51].

Таблица 2.3. Химический состав золы-уноса

Потери при прокаливании. масса, %.	Содержание оксидов, масса %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₂
7,27-7,42	47,3- 49,5	22,92-24,3	4,94- 6,23	8-10	1,5-2,3	0,1-0,3	0,42- 0,7

Таким образом, использование золы-уноса вместе с портландцементом действительно позволяет получить вяжущий материал с физико-механическими характеристиками, аналогичными или близкими к бетону на чистом портландцементе, но с рядом дополнительных преимуществ, таких как улучшенная долговечность, плотность и экономическая эффективность [17, 45, 51].

Для управления процессом создания вяжущего используются щелочные компоненты в виде водных растворов [26, 38, 55, 78, 112]. В таблице 2.4 приведён объёмный состав щелочного компонента.

Таблица 2.4. Состав щелочных компонентов по объёму

№	Наименование щелочных компонентов	Содержание раствора щелочного компонента, л	Плотность щелочных компонентов, кг/м ³	Содержание раствора щелочного компонента, л	Плотность щелочных компонентов, кг/м ³
1	Силикат натрия растворимый, μ _c =2,6	0,5	1300	0,75	1300
2	Содосульфатная смесь, л	0,5	1200	0,25	1200

В сравнительных опытах в качестве вяжущего использовали портландцемент нормального твердения. В таблицах 2.5 и 2.6 приведены химический и минералогический составы минералов портландцемента. Тонкость помола после измельчения составляет $Sy_d = 350\text{--}400 \text{ м}^2/\text{кг}$. На

рисунке 2.1 представлены результаты рентгенофазового анализа портландцемента ПЦ 500 [26].

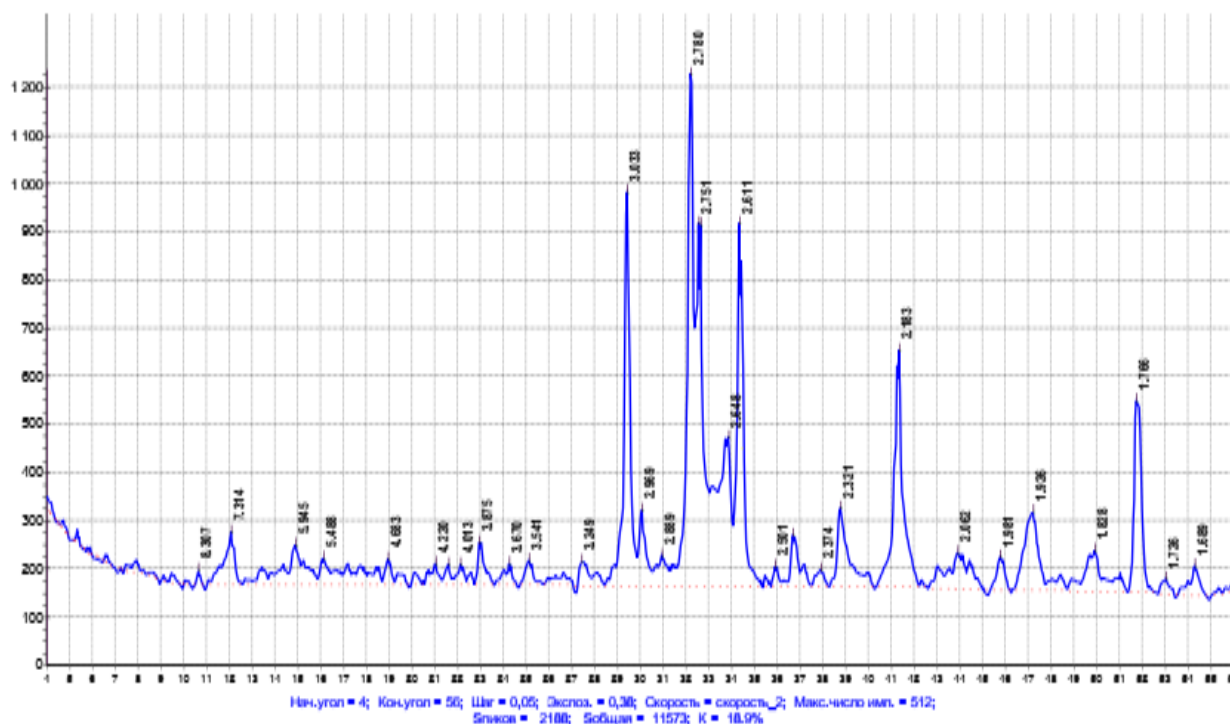


Рисунок 2.1 — Рентгенограмма портландцемента марки ПЦ 500

На рентгенограммах видно, что продуктами новообразований в портландцементе ПЦ 500 в основном являются алит C_3S ($d = 3,033; 2,780; 2,751; 2,611; 2,321; 2,183; 1,766 \text{ \AA}$), белит C_2S ($d = 2,751; 2,501; 2,183; 1,926 \text{ \AA}$), четырёхкальциевый алюмоферрит C_4AF ($d = 2,648; 1,926; 1,726 \text{ \AA}$), трёхкальциевый алюминат C_3A ($d = 4,22; 2,183; 1,828 \text{ \AA}$) [26].

В таблицах 2.5, 2.6 и 2.7 представлены физико-механические свойства, минералогический и химический состав портландцемента ПЦ 500.

Таблица 2.5. Минеральный состав портландцемента марки ПЦ 500, мас. %

алит C_3S	белит C_2S	трикальциевый алюминат C_3A	тетракальциевый алюмоферрит C_4AF
61,9-63,5	15,6-17,2	4,1-5,3	13,6-14,5

Таблица 2.6. Химический состав портландцемента марки ПЦ 500, масс. %

CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O	п.п.п
60,58-62,32	22,39-23,92	5,79-6,52	5,58-6,93	0,89-1,29	0,30-0,9	0,18-0,53	0,32-0,68

Таблица 2.7. Физико-механические свойства портландцемента

№ п/п	Наименование показателей	ПЦ 500
1	Тонина помола, см ² /г	3120
2	Нормальная густота (НГ), %	24,9
3	Сроки схватывания, ч-мин: - начало; - конец.	1-45 3-00
4	Водоцементное отношение (В/Ц)	
5	Прочность цемента через 1 сутки нормального твердения, МПа: - при изгибе - при сжатии.	2,9 15,1
6	Прочность цемента после пропаривания, МПа: - при изгибе; - при сжатии.	6,4 38,4
7	Прочность цемента в возрасте 28 суток нормального твердения, МПа: - при изгибе; - при сжатии.	7,5 50,9

В экспериментальных исследованиях в качестве заполнителей использовались растительное сырье сельского хозяйства — измельчённые стержни кукурузных початков ТОО «Таразского агропромышленного комплекса».

Вид стержней кукурузных початков приведён на рисунке 2.2.

Для проведения опытно-экспериментальных работ приняты стержней кукурузных початков (початки) урожая 2020 года.



Рисунок 2.2 — Вид стержней кукурузных початков.

Кукурузные початки подвергались измельчению на измельчительной машине марки Tazz K 32 в производственных условиях ТОО «Таразского агропромышленного комплекса» (г. Тараз, Казахстан).

Измельчённые стержни кукурузных початков по длине составляли от 10 до 40 мм, а по ширине — 10–15 мм.

Размеры измельчённых стержней кукурузных початков представлены на рисунке 2.3.

Влажность целлюлозного органического материала в виде стержней кукурузных початков на момент проведения экспериментальных работ составляла 3–5 %.



Рисунок 2.3. Вид измельченных стержней кукурузных початков, используемых в исследованиях

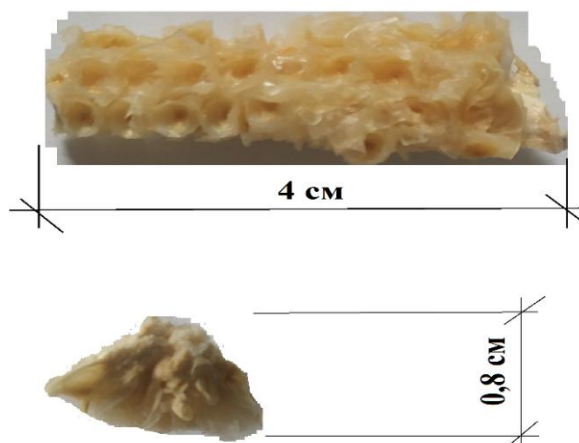


Рисунок 2.4. - Размеры по длине и ширине измельченных стержней кукурузных початков, используемых в исследованиях

Физико-химические характеристики, химический состав и фракционный состав измельчённых стержней кукурузных початков определялись экспериментально с использованием методик, предусмотренных ГОСТ 15113.2–78, ГОСТ 13496.4–92 и ГОСТ 10846–91, а также на основании данных, полученных из литературных источников и справочной информации [31, 53, 95].

Химический состав стержней кукурузных початков представлен в таблице 2.9.

Таблица 2.9. Химический состав стержней кукурузных початков

Измельченные стержней кукурузных початков	Содержание компонентов, %			
	Целлюлоза	Лигнин	Пентазон	Полисахариды
	38,5-39,3	18,7-19,3	16,8-17,9	22-25

В таблице 2.10. представлен фракционный состав измельченных стержней кукурузных початков.

Таблица 2.10. Фракционный состав измельченных стержней кукурузных початков

Вид заполните ля	Содержание фракций, % по массе, на ситах с размером ячеек, мм					
	40	20	10	5	2,5	1,25
Частные Полные	Нерассеянные измельченные стержни кукурузных початков					
	–	16	2,4	46,6	19	13
	–	16	18,4	65	84	97

2.2. Влияние соотношения компонентов на свойства вяжущего материала и научные принципы его выбора

Соотношение компонентов играет ключевую роль в формировании свойств вяжущего материала. Различные комбинации компонентов влияют на прочность, плотность, теплопроводность и другие показатели материала.

Увеличение доли шлака и золы-уноса придаёт бетону высокую прочность и долговечность. Чем больше доля шлака и золы-уноса в смеси, тем более прочным и устойчивым к внешним воздействиям становится материал [17, 45, 55].

Для активации шлака, которая обеспечит требуемую величину прочности композита, необходимо достаточное количество щелочных реагентов. Однако при избытке этих компонентов материал может иметь повышенную хрупкость [38, 55, 78].

При меньшем содержании органического заполнителя в бетоне формируется более плотный и прочный материал. Но для повышения теплоизоляционных свойств необходимо увеличивать количество стержней кукурузных початков, которые имеют развитую пористую структуру [95, 109, 123].

Для получения прочного и плотного композита нужно подобрать оптимальное водоцементное соотношение [15]. Бетоны с высокими значениями В/Ц имеют повышенную пористость и сниженную прочность.

Выбор компонентов для вяжущего материала основывается на ряде научных принципов: теории прочности агрегатно-структурированных материалов, щелочной активации шлаков, экологической эффективности, ресурсосбережении и использовании золы-уноса как пуццолановой добавки [12, 38, 45, 53, 85].

Теория прочности агрегатно-структурированных материалов описывает взаимодействие между частицами заполнителей и вяжущей матрицей. Использование органического сырья, таких как кукурузные стержни, в комбинации с неорганическими компонентами требует особого внимания к адгезии между фазами. Оптимизация соотношения компонентов и уменьшение толщины слоя вяжущей матрицы способствуют улучшению адгезии и когезии материалов [28, 47, 74].

Использование гранулированного электролитического шлака и щелочных активаторов (жидкое натриевое стекло, содосульфатная смесь) основано на способности этих материалов вступать в реакцию с алюмосиликатными компонентами и образовывать цементоподобные структуры. Щелочная активация давно известна как метод получения прочных

и долговечных материалов из промышленных побочных продуктов [38, 55, 116].

Важной научной основой является принцип устойчивого развития и минимизации антропогенного воздействия (или: производственных потерь). Автор стремится использовать вторичные ресурсы промышленных предприятий (зола-унос, шлак) и агропромышленных продуктов (стержни кукурузных початков), что не только снижает стоимость сырья, но и решает экологические проблемы [53, 85, 95].

Зола-унос выступает в качестве пуццолановой добавки, которая улучшает структурные свойства бетона. Пуццоланы активируют гидратационные процессы, что способствует повышению прочности вяжущего материала и долговечности [45, 51].

2.3. Методы и методики исследований, приборы и оборудование

В соответствии с ТУ 14-147-44-92 Вяжущие шлакощелочные. Технические условия. были приготовлены и испытаны шлакощелочные композиционные вяжущие. ГОСТ 310.3-76 "Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема» определяли физико-технические свойства цементной пасты: плотность и сроки схватывания цементной пасты [38, 55].

В соответствии с ГОСТ 10180–2012 "Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам" проводилось изготовление и испытание шлакощелочных образцов размером 40х40х160 мм – балок [95, 109].

Оценка измельчения шлакощелочных вяжущих по тонкости помола (S , см²/г) проводилась при конкретных временных интервалах измельчения в планетарной мельнице «Активатор-4М» и мельнице СВМ-3 [20, 33, 120] (рисунок 2.5).

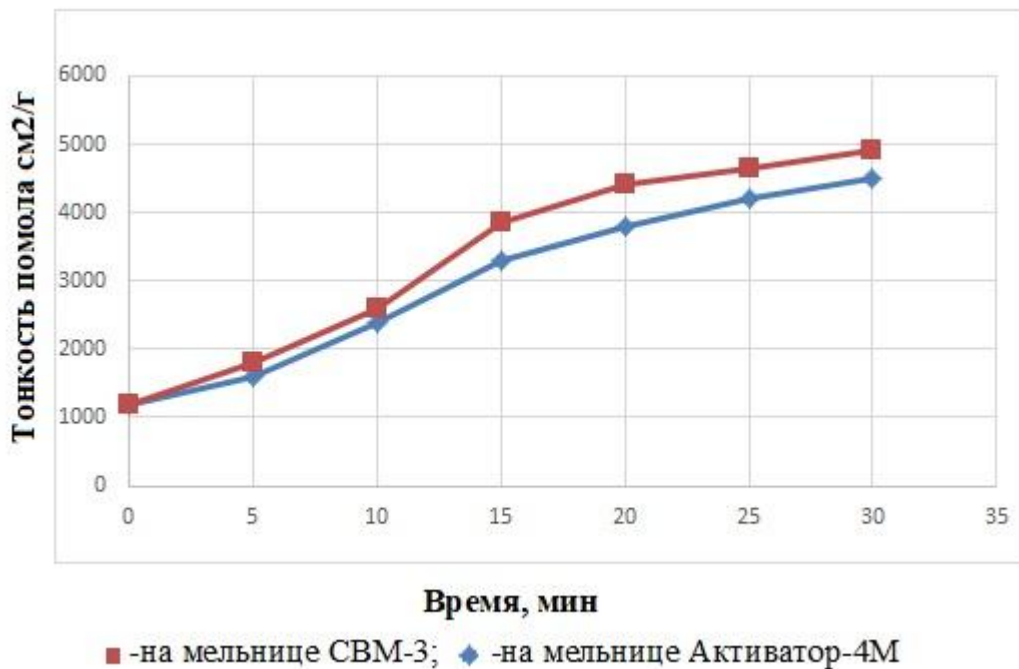


Рисунок 2.5 – Зависимость тонкости помола шлакощелочных вяжущих от времени измельчения

Консистенцию цементно-песчаного раствора измеряли на встряхивающем столе стандартным конусным методом по ГОСТ 10181-2000 "Бетонные смеси. Методы испытаний [41].

Изготовленные образцы балок хранились на воздухе в форме с закрытой крышкой в течение 3 дней, затем извлекались и хранились при нормальных условиях влажности до проведения испытаний [41].

Образцы балок были испытаны по ускоренному методу, как того требует ГОСТ 10180–2012 «Бетон. Методы определения прочности по контрольным образцам», не менее чем через 4 часа после изготовления и не позднее чем через 12 часов [95, 109].

При изотермической температуре нагрева 95 ± 5 °С готовые образцы подвергались термообработке в форме (ТМО) в течение 3+6+3 часов. Образцы были осмотрены через один день после даты изготовления» [2, 4, 5, 6].

Для определения структурных и технических свойств легкого бетона на шлакощелочном вяжущем используются следующие нормы и технические документы:

- ГОСТ 10180–2012 «Бетон. Методы определения прочности по контрольным образцам»
- ГОСТ 12730.0–2020 «Бетоны. Методы испытаний прочности. Часть 0. Общие требования».

Плотность легкого бетона определялась на образцах 10x10x10 см в соответствии с ГОСТ 12730.0–2018 и ГОСТ 12730.1-2020 [2, 3, 4].

Прочность при изгибе и сжатии легкого бетона на основе шлакового вяжущего и стержней кукурузных початков была проверена на образцах балок. Образцы цементно-песчаного раствора размером 40 × 40 × 160 мм изготавливались на опытных прессах ПСУ-10, ПСУ-50 и ПСУ-200 при коэффициенте нагрузки 0,1 МПа/с и изгибались с помощью МИИ-100 [1, 2, 4, 63, 95, 98].

Согласно ГОСТ 10060–2012 методом ускоренного замораживания и ускоренного оттаивания в морозильной камере при $t = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ определялась морозостойкость бетонных образцов, в результате чего происходит потеря прочности и массы образца [2, 3, 4, 6].

Для помола шлакового вяжущего и шлака использовались мельницы Мл-1, «Активатор-4М» и СВМ-3.

Водопоглощение и пористость легких бетонов на основе стержней кукурузных початков определяли по методике ГОСТ 12730.3–2020.

На основе экспериментальных результатов была исследована зависимость скорости водопоглощения полученного бетона от его состава.

На приборе ПСХ-12 измеряли крупность измельчения вяжущего материала, а фракционный состав измельченного материала определялся методом объективного лазерного рассеяния с помощью прибора Fritsch Particle Sizer ANALYSETTE 22 [6, 7, 26, 64].

Рентгенофазовый анализ шлакощелочно-цементных камней проводили ионизационным методом, и интенсивность излучения регистрировалась на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker).

Исследование проводилось с помощью рентгеновского или спектроскопического метода. Сигнал фиксировался очень быстро — примерно за 0,02 секунды на каждый участок. Измерения проводились по шагам в диапазоне от 3 до 650 единиц, что позволяло подробно проследить характеристики образца. Для создания излучения использовалась лампа с напряжением 40 кВ и током 30 мА [6, 49, 63, 97].

Для физико-химических исследований использовались термогравиметрия и дифференциальная сканирующая калориметрия с помощью прибора STA 409 PC Luxx (Netzsch, Германия), режим визуализации 10 градусов/мин, платиновый тигель, воздушная среда [6, 40, 56, 97].

Микроструктура композитных образцов шлакощелочного связующего была исследована с помощью низковакуумного сканирующего электронного микроскопа JSM-6460LV в сочетании с энергодисперсионной приставкой EDX-INCA300 [6, 56, 63, 72].

Обработка результатов эксперимента для оптимизации состава бетона (расчет коэффициентов уравнений, дисперсионный анализ, регрессионный анализ) проводилась по общепринятым методикам. Для расчетов использовалась программа Microsoft Excel.

Для резки сухих кукурузных початков и получения необходимого размера заполнителя использована бензиновая измельчительная машина марки Tazz K32, работающая от бензинового двигателя. Конструкция металлическая, что обеспечивает прочность и стойкость к механическим повреждениям. Аппарат хорошо подходит для измельчения сухих кукурузных початков.

Характеристики и внешний вид бензинового измельчителя марки Tazz K32 приведены в таблице 2.11 и на рисунке 2.6.

Таблица 2.11. Характеристики бензинового измельчителя марки Tazz K32

1	Система измельчения	ножевая
2	Материал корпуса	металлическая
3	Диаметр веток	75 мм
4	Контейнер	имеются
5	Скорость вращения	3600 об/мин
6	Вес	54,9 кг
7	Двигатель	бензиновый, 212 см ³
8	Мощность	7 л.с
9	Тактность	4-тактный
10	Объем топливного бака	3,6 л
11	Объем картера двигателя	0,5 л



Рисунок 2.6 – Измельчительная машина марки Tazz K32

В соответствии с задачами настоящей работы теоретические и экспериментальные исследования включают изучение физико-механических процессов, происходящих при структурообразовании шлакощелочных легких бетонов на основе стержней кукурузных початков и щелочных легких бетонов

на основе целлюлозоорганического заполнителя. Они включают изучение структурных характеристик бетонов, технических параметров их производства, а также изучение физико-механических и деформационных свойств [30, 38, 52, 54, 63, 95, 112, 119].

Исходя из этого, в первую очередь было проведено исследование по подбору состава раствора щелочных компонентов. Приготовление шлакощелочного вяжущего осуществлялось путем смешивания молотого шлака с раствором щелочного компонента. Щелочной компонент вводили в виде раствора плотностью 1100–1350 кг/м³ вместе с водой. Образцы подвергались как пропариванию, так и выдерживанию в естественных условиях [38, 67, 78, 92, 119].

Марку шлакового вяжущего определяли по прочности стандартного образца вяжущего раствора в соответствии с методикой ГОСТ 10180–2012 «Бетон. Методы определения прочности по контрольным образцам». Нормальную плотность, сроки схватывания и равномерность изменения объёма шлакощелочных вяжущих определяли по ГОСТ 310.3-76 «Вяжущие вещества. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объёма». Образцы формовали на стандартной виброплатформе ВС-1 при времени прессования 3 минуты [26, 38, 41, 60, 97].

После определения оптимального состава вяжущего приступали к оптимизации составов шлакощелочного легкого бетона. Свойства органических наполнителей исследовали экспериментально с использованием стандартных методов, предусмотренных ГОСТ 19222–2019 «Сырьё растительное для строительных материалов. Методы испытаний» [7, 25, 42, 67, 92, 98].

Смесь шлакощелочного легкого бетона готовилась следующим образом. К сухой смеси сначала добавляли шлак, содержащий органический заполнитель (измельчённые кукурузные початки), а затем приготовленный раствор щелочного компонента, который перемешивали до образования однородной массы [38, 78, 95, 98, 112].

Для изучения влияния этих факторов на физико-механические свойства шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков варьировали в широких пределах плотность раствора щелочного компонента и соотношение Р/Ш (раствор-шлак). Приготовленная легкобетонная смесь укладывалась в предварительно очищенную и промасленную опалубку размером $10 \times 10 \times 10$ см, штыковалась, уплотнялась и закреплялась в соответствии с требованиями ГОСТ 19222–2019 [42, 54, 78, 95, 98].

Оптимизацию состава, свойств и технологии шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков проводили с помощью математического планирования экспериментов. Обработку результатов эксперимента (расчёт коэффициентов, уравнений, дисперсионный и регрессионный анализ) проводили по общепринятым методикам. Физико-механические свойства шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков определяли по ГОСТ 19222–2019, ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 10180-2012 [42, 54, 95, 98].

Для отверждения образцов в исследовании использовались различные условия — естественные, термообработка и обработка паром. При исследовании зоны контакта между органическими заполнителями и шлакощелочными вяжущими использовалось несколько независимых методов для получения достаточно полных и достоверных данных о процессах, происходящих во время контакта между вяжущим и шлаковыми заполнителями [7, 38, 56, 63, 98].

Исследование динамики процесса структурообразования шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков при температуре от 10 до 800°C проведено путём измерения скорости распространения (V) продольных волн, связанных с изменением упругих свойств [12, 28, 56, 65, 83].

Исследование деформационных свойств шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков проведено в климатических условиях западного региона Казахстана (г. Актобе) и в камере нормального

твердения. Измерения деформации сжатия были проведены через 28 дней после отверждения в естественных условиях. Ползучесть шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков исследовали также на призматических образцах размером $10 \times 10 \times 40$ см, образцы испытывались через 28 суток после твердения в естественных условиях. Напряжение сжатия шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков составляет 0,3 при переменной прочности [11, 21, 42, 61, 89, 98].

Исследование специальных свойств (теплопроводность, огнестойкость, биостойкость) легких бетонов на основе стержней кукурузных початков проведено при широком варьировании изучаемых факторов. Исследования теплопроводности проводились на образцах размером $4 \times 4 \times 16$ см в воздушно-сухих условиях [25, 70, 103, 109, 123, 125].

Исследование биостойкости шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков проведено совместно с кафедрой микробиологии Западно-Казахстанского медицинского университета им. М. Оспанова, г. Актобе (Казахстан).

Испытания по определению показателя огнестойкости легкого бетона на основе стержней кукурузных початков методом КТ производились в лаборатории пожарной безопасности ДЧС Актобе [50, 109, 113].

Выводы по главе 2

1. Проведен подбор компонентов вяжущего материала и органического заполнителя. В состав предложено дополнительно включить гранулированный электролитический шлак, золу-унос и щелочные активаторы, а также стержней кукурузных початков, что должно обеспечить сочетание прочности, теплоизоляционных свойств, водо- и морозостойкость легкого бетона.

2. Предложена технологическая схема измельчения стержней кукурузных початков. Выбрана методика приготовления шлакощелочного

вяжущего путем смешивания молотого шлака с раствором щелочного компонента.

3. Подобраны методы проведения испытаний физических и механических свойств образцов: плотность, прочность при сжатии и изгибе, водопоглощение, пористость, морозостойкость, теплопроводность, огнестойкость и биостойкость. Использованы стандартизированные методы в соответствии с ГОСТ 10180–2012, ГОСТ 12730–2018, ГОСТ 19222–2019 и другие действующие нормативы.

Глава 3. Структурообразование и технологические особенности изготовления шлакощелочных легких бетонов на основе стержней кукурузных початков

Легкий бетон на основе шлакощелочного вяжущего и растительных органических заполнителей формируется как сложный композитный материал, структура которого определяется взаимодействием неорганической гидратируемой матрицы и пористого органического наполнителя. Вяжущее состоит из минералов шлака, портландцемента, фосфорного шлака, золы-уноса и содосульфатной смеси, активированных щелочным раствором, что обеспечивает высокую химическую реактивность компонентов [14, 38, 52, 61, 78, 112].

Частицы органических заполнителей при гидратации минеральных компонентов вяжущего и формировании структуры цементного камня окружены цементным раствором. Этот слой очень тонкий, но после затвердевания обладает высокой плотностью и микротвердостью [26, 38, 56, 63, 65].

Вследствие высокой пористости, стержни кукурузных початков быстро поглощают щелочной раствор, который усиливает химическую активацию минеральных компонентов вяжущего, улучшает взаимодействие с наполнителями и повышает их механическое сцепление. Глубина проникновения раствора в поры может достигать 105–135 мкм, формируя прочную контактную оболочку шириной 35–60 мкм. Этот слой эффективно передает нагрузки от органического наполнителя к твердым гидратам вяжущего и обеспечивает улучшенные физико-механические свойства бетона [12, 25, 47, 56, 63].

Степень гидратации и плотность контактной зоны зависят от размера фракций органического наполнителя, его влажности, шероховатости поверхности и концентрации щелочного раствора. При оптимальном подборе компонентов формируется однородная структура легкого бетона с низкой

плотностью и высокой прочностью на сжатие. Одновременно пористость органического материала способствует образованию самоуплотняющихся эффектов, которые усиливают проникновение раствора в наполнители и активируют шлаковые компоненты, ускоряя процесс гидратации и увеличивая микротвердость контактной зоны [19, 38, 47, 54, 63].

Таким образом, структурные процессы в шлакощелочном вяжущем с органическими заполнителями включают:

1. Гидратацию минералов вяжущего и формирование кристаллогидратов.
2. Обволакивание и интеграцию пористых органических частиц в структуру бетона.
3. Формирование прочного контактного слоя между вяжущим и наполнителем, обеспечивающего механическое и химическое сцепление.
4. Капиллярное взаимодействие и самоуплотнение, способствующее проникновению щелочного раствора в поры наполнителя и активации гидратируемых компонентов.
5. Распределение нагрузки и повышение микротвердости контактного слоя, что увеличивает прочность и долговечность легкого бетона.

Эти процессы определяют ключевые физико-механические характеристики шлакощелочного легкого бетона: прочность, плотность, теплопроводность и долговечность, а также обеспечивают оптимальную композитную структуру, необходимую для эффективного использования растительных заполнителей в строительных материалах [12, 25, 38, 56, 63, 70, 125].

3.1. Исследование влияния водорастворимых веществ, содержащихся в стержнях кукурузных початков, на свойства и структуру камня шлакощелочного вяжущего

Отличие в строении стержня кукурузного початка и древесины заключается в более однородной складчатой структуре у кукурузы.

Исследование анатомических особенностей структуры древесного кольца стержня кукурузного початка выявило наличие развитой системы равномерно распределённых полых осевых каналов, диаметры которых варьируются от 10 до 67 мкм, что значительно превышает толщину стенок каналов, составляющую от 1,3 до 4,3 мкм. Эти каналы имеют округлую форму и характеризуются выраженной спиральной и кольцевой структурой стенок (рисунок 3.1) [63, 77, 114].



а)



б)

Рисунок 3.1. Структуры а) сердцевины и б) древесного кольца кукурузного початка (увеличение 500)

Такие особенности анатомии кукурузного стержня способствуют улучшению адгезии и взаимодействия с цементной матрицей в лёгком бетоне, обеспечивая более равномерное распределение напряжений и повышение прочности готового материала [19, 47, 56, 61, 63].

Структура сердцевины кукурузного початка значительно отличается от структуры древесного кольца. Поры в сердцевине имеют неопределённую форму с плавными волнообразными выступами и тонкими, непрочными стенками. Эти поры равномерно распределены по всей сердцевине и не имеют осевой направленности. Примерный диаметр пор составляет 41–42 мкм, при этом толщина их стенок не превышает 1 мкм. Такие структурные особенности сердцевины кукурузного початка влияют на его поведение при использовании в качестве заполнителя в лёгких бетонах, так как они способствуют

повышенной пористости и, следовательно, могут влиять на водопоглощение и прочностные характеристики готового материала [16, 63, 91, 114].

Кукурузные початки на 45 % состоят из целлюлозы, пектина, лигнина, гемицеллюлозы и небольшого количества экстрактивных веществ (дубильные вещества (пигменты) и масла) [16, 34, 47, 63, 91].

Основные компоненты органического заполнителя — целлюлоза и лигнин — являются достаточно стабильными веществами, которые не влияют на процесс схватывания цементного вяжущего. Пектиновые и гемицеллюлозные фракции стержней кукурузных початков представляют собой комплекс олигосахаридов и полисахаридов, которые могут быть гидролизваны до водорастворимых сахаров в щелочной среде [26, 34, 47, 61, 101].

Даже самые простые водорастворимые сахара (сахароза, глюкоза и фруктоза) присутствуют в стержнях кукурузных початков лишь в небольшом количестве (0,1–0,5 % по массе). Водорастворимые сахара легко вымываются из раствора «минерализатора» в шлакощелочное вяжущее из-за малого размера молекул [61, 80, 101, 115].

Экстрагированное вещество, танин, имеет большой размер молекул. Его просто смывают с древесины горячей водой или горячим «минеральным» раствором и дают ему тщательно осесть. Следовательно, танины не оказали существенного влияния на твердение цемента. Смолистые вещества, содержащиеся в стержнях кукурузных початков, также не оказывали влияния на твердение цемента. Смоляная кислота в стержнях кукурузных початков взаимодействует со щелочами в цементном тесте, образуя мыльную воду. Высокое содержание смол в стержнях кукурузных початков несколько снижает прочность лёгкого бетона, изготовленного с использованием стержней кукурузных початков, из-за снижения смачиваемости частиц стержней кукурузных початков и их адгезии к шлакощелочному вяжущему [47, 61, 80, 101, 115].

Исследования показали, что стержни кукурузных початков содержат вещества, которые легко гидролизуются и выделяются, или «цементные яды», которые токсичны для цемента и замедляют набор прочности образцов. Щелочная среда цементной пасты имеет тенденцию к выделению «цементных ядов». Количество этих ядов сильно варьируется в зависимости от типа сырья, их состояния и хранения [19, 47, 61, 80, 101, 115].

Известно, что влияние водорастворимых веществ, полученных из стержней кукурузных початков, на отверждённые связующие композиции проявляется в виде стабилизирующего эффекта, подобного эффекту ПАВ [6, 36, 45, 59]. «Цементные яды» состоят в основном из углеводов, которые откладываются на поверхности частиц минерального вяжущего, образуя тонкую оболочку, изолирующую частицы вяжущего от воды и задерживающую процесс гидратации. Содержание полисахаридов значительно различалось между типами растительного материала, при этом у ели оно было самым низким (17,3 %), а у кукурузной шелухи и виноградных стеблей — самым высоким (21,4 % и 27,1 %) [47, 61, 80, 101, 115].

Известны различные методы и технологии для снижения негативного влияния водорастворимых экстрагируемых и легко гидролизующихся веществ на прочность лёгких бетонных композитов. Например, метод частичного удаления этих веществ из растительного сырья. Во многих случаях предлагаемые методы «минерализации» органических наполнителей включают обработку наполнителя в несколько этапов различными химикатами, последующее кипячение или промывку, хранение в силосах для стабилизации физических свойств, принудительную сушку и т.д.. Однако метод «минерализации» растительных заполнителей увеличивает начальную скорость развития прочности, но не даёт при последующем твердении материалов с достаточной прочностью [7, 25, 61, 80, 101, 115].

Исследования [47, 61, 80, 101, 115] показали, что прочность лёгких бетонных композитов может быть увеличена на 10–15 % путём удаления легко гидролизующихся веществ из стержней кукурузных початков. Поэтому можно

рассматривать это только как один из недостатков наличия таких веществ в органических заполнителях.

3.2. Технологическая схема извлечения экстрактов из стержней кукурузных початков

Стержни кукурузных початков представляют собой сложный биополимерный материал растительного происхождения, включающий стержни, покровные листья (обёртки) и рыльца початков. Эти анатомические части различаются по структурно-морфологическим характеристикам и химическому составу, вследствие чего по-разному реагируют на физико-химические методы экстрагирования. В составе клеточных стенок данных материалов присутствуют целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, пектиновые вещества, фенольные соединения, воски и низкомолекулярные растворимые компоненты. Отличия в их количественном соотношении создают необходимость адаптации технологических схем в зависимости от целевого вида экстракта и ожидаемых функциональных свойств [16, 34, 63, 91, 111, 114].

Для формирования оптимальных режимов экстракции предварительно проводится оценка химического состава различных анатомических элементов стержней кукурузных початков. Эти данные имеют критически важное значение для определения доступности полисахаридных матриц, степени связности структурных компонентов и устойчивости материала к термическому и химическому воздействию. В таблице приведены обобщённые значения содержания основных биополимеров [16, 34, 63, 91]. Результаты анализа представлены в таблице 3.1.

Для получения экстрактов из стержней кукурузных початков выполняется ряд технологических операций, начинающийся со сбора и подготовки сырьевого материала. Смесь разных фракций сортируется и

разделяется по видам, при этом удаляются примеси (зерна, песок, листья и т.п.) [16, 77, 91, 100, 114].

Таблица 3.1 — Содержание компонентов в разных частях кукурузных початков

Анатомическая часть	Целлюлоза, %	Гемицеллюлоза, %	Лигнин, %	Пектиновые вещества, %	Минеральные вещества, %
Стержень початка	36–45	25–32	12–18	3–5	1–2
Обёртки	28–35	22–28	5–10	6–12	2–4
Рыльца	15–25	18–23	2–4	10–20	3–6

Затем сырье промывается для удаления водорастворимых примесей и мешающих экстракции целевых компонентов веществ. Промывку выполняют в проточной воде или в водных ваннах с периодической циркуляцией жидкости. От эффективности этой стадии зависит как качество экстракта, так и стабильность его хранения [16, 91, 100, 114].

Следующей стадией является сушка. Пониженная влажность обеспечивает повышение эффективности экстракции, предотвращает гидролитическое разрушение полисахаридов и повышает удельную поверхность измельчённого сырья. Сушка проводится при 60–70 °С в конвективных сушильных установках. Рыльца и обёртки высыхают быстрее, тогда как массивные стержни требуют более длительного времени, что учитывается при проектировании режима [16, 91, 111, 121].

После сушки выполняется измельчение. Эта стадия обеспечивает дробление структурных элементов клеточной стенки и облегчает доступ растворителя к внутренним частям биополимерной матрицы. Диапазон фракций 0,5–2 мм считается оптимальным: слишком мелкое измельчение приводит к образованию плотных суспензий и затрудняет фильтрацию, слишком крупное – снижает выход экстрактивных веществ. Для измельчения

применяются молотковые или ножевые дробилки, реже — роторные мельницы для получения узких фракций [20, 24, 64, 79, 81].

Ключевой стадией является экстрагирование. Выбор растворителя обусловлен химической структурой целевых компонентов. Пектиновые вещества и растворимые углеводы эффективно переходят в воду, поэтому для их извлечения используется горячая водная экстракция при 70–90 °С. Для получения фенольных соединений и антиоксидантов применяется этанол концентрацией 40–70 %, позволяющий разрушать слабые водородные связи и извлекать низкомолекулярные органические вещества. При необходимости выделения гемицеллюлоз используют слабощелочную среду, так как щелочные растворы способны частично разрушать лигнин-углеводные комплексы, облегчая переход гемицеллюлоз в жидкую фазу [26, 34, 70, 101].

Экстрагирование проводится в аппаратах периодического или непрерывного действия, с перемешиванием или ультразвуковым воздействием. Температурный режим строго контролируется для предотвращения термической деградации компонентов. Время процесса составляет 1–3 часа, однако может варьироваться в зависимости от характеристик сырья. В ряде случаев применяется двухступенчатая схема: предварительная водная экстракция с последующим спиртовым извлечением более устойчивых и труднорастворимых веществ (Рисунок 3.2) [24, 26, 70, 101].

После экстракции проводится фильтрация полученной суспензии. Отфильтрованная твердая фракция утилизируется, а жидкая фаза проходит через операции очистки (отстаивание, фильтрация, сепарация), в результате чего на выходе образуется чистый экстракт [24, 26, 64, 79].

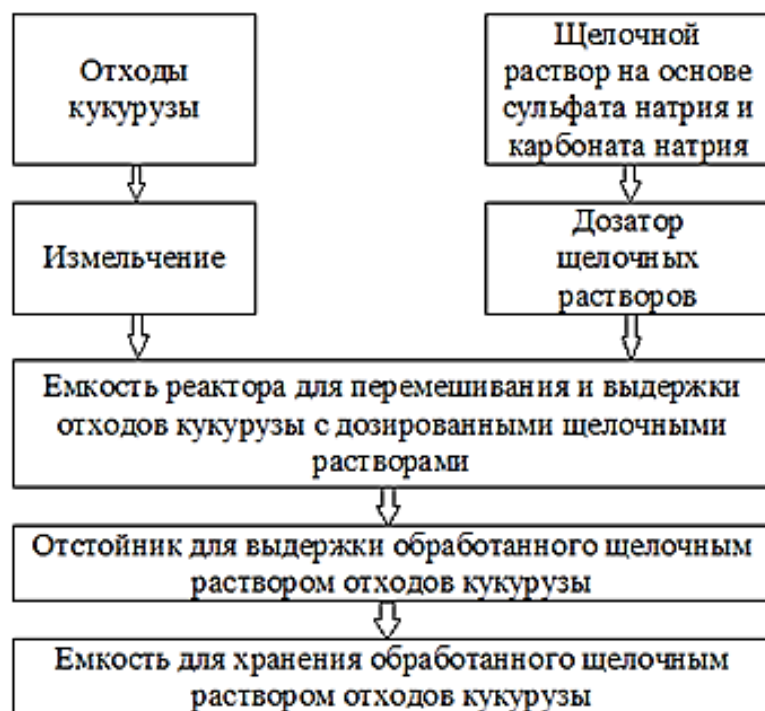


Рисунок 3.2 — Последовательность операций экстрагирования стержней кукурузных початков

Концентрирование экстракта проводится вакуумным выпариванием при температурах до 50–60 °С. Затем в концентрат добавляется спирт для стабилизации и регулирования кислотности, что необходимо для его хранения. Для перевода экстракта в порошкообразное состояние его высушивают при распылении [16, 26, 70, 111, 121].

Использование полученного экстракта при изготовлении лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков способствует модификации характеристик цементного камня за счет наличия в составе пектиновых и фенольных веществ [6, 17, 26, 57, 98].

3.3. Исследование влияния стержней кукурузных початков на физико-механические свойства шлакощелочного вяжущего лёгкого бетона

Известно, что повышение прочности, а также ускорение процессов структурообразования и твердения композитов лёгких бетонов на основе

органических заполнителей достигается за счёт применения специальных добавок и предварительной обработки растительного сырья, включая древесную щепу, конопляный и льняной костёр и другие виды органических материалов [14, 17, 57, 80, 107, 115]. Существенным фактором, ограничивающим эффективность использования органических заполнителей, является наличие в их составе водорастворимых веществ, прежде всего простых сахаров и низкомолекулярных органических соединений, оказывающих ингибирующее воздействие на процессы гидратации и щелочной активации вяжущих систем.

В связи с этим в рамках экспериментальных исследований была проведена двухсуточная водная экстракция органического заполнителя из стержней кукурузных початков, затворённого водой, с целью оценки степени удаления водорастворимых компонентов и изменения его физико-химических характеристик. Экстракция выполнялась в лабораторных условиях при нормальной температуре окружающей среды (20 ± 2) °C. После завершения экстракции водная вытяжка подвергалась фильтрации, а образцы органического заполнителя высушивались до постоянной массы для последующего определения их физико-химических показателей при стандартных условиях.

В таблице 3.2 представлены данные об изменении характеристик водной вытяжки и стержней кукурузных початков после 2 суток экстракции. pH водной вытяжки становится близким к нейтральному, а массовая доля водорастворимых веществ уменьшается в 1,5–2 раза. Потери массы органического заполнителя составляют 1,8–3,1 %. Электропроводность раствора уменьшается в 2 раза. Это свидетельствует о частичном удалении растворимых органических и минеральных соединений, способных активно взаимодействовать с компонентами вяжущего.

Установлено также, что после водной экстракции наблюдается снижение водопоглощения органического заполнителя, что связано с удалением части поверхностных и капиллярно-связанных веществ,

обладающих высокой гидрофильностью. Полученные результаты указывают на изменение состояния поверхности и поровой структуры стержней кукурузных початков, что имеет принципиальное значение при их использовании в составе шлакощелочных лёгких бетонов.

Таблица 3.2 – Влияние экстракции на показатели водной вытяжки и органического заполнителя

№ п/п	Показатель	До водной вытяжки	После 2 суток водной вытяжки
1	Массовая доля водорастворимых веществ, %	4,5–6,2	2,1–3,4
2	Потеря массы органического заполнителя, %	—	1,8–3,1
3	рН водной вытяжки	5,2–5,8	6,3–6,9
4	Электропроводность раствора, мСм/см	1,6–2,3	0,7–1,1
5	Водопоглощение органического заполнителя, %	180–210	155–175

В ходе водной экстракции продолжительностью 2 суток наблюдалось частичное вымывание водорастворимых компонентов стержней кукурузных початков, что подтверждается снижением массы сухого остатка после отделения жидкой фазы. На поверхности органических наполнителей сохранялись нерастворимые фракции, однако их возможное влияние на последующие химические процессы в составе композиций требует дополнительной экспериментальной оценки и не может быть однозначно интерпретировано без количественных данных [61, 80, 101, 115].

Общее количество экстрагируемых водой веществ из кукурузных початков составляет 2–5 % по весу, из которых стеблевой сахар составляет 0,091 %, а коровой сахар — 1,73 % [16, 61, 80, 101].

После первичной обработки целлюлозного органического заполнителя шлакощелочным водным раствором вредное воздействие поверхностно-

активных веществ на шлакощелочное вяжущее снижается, и создаются условия гидратации вяжущих составов в зоне контакта органического заполнителя с шлакощелочным вяжущим веществом [47, 61, 80, 101, 115].

Для дальнейшего ускорения гидратации шлакощелочного вяжущего в состав вяжущего вводят минеральные добавки в виде золы-уноса, жидкого стекла и 7% портландцемента [60, 97, 112, 115, 116].

Для определения влияния целлюлозного органического заполнителя на основе стержней кукурузных початков на физико-механические свойства разрабатываемого шлакощелочного легкого бетона были проведены исследования методом затворения шлакощелочного вяжущего двухсутковой водной вытяжкой из измельчённых стержней кукурузных початков (таблица 3.3 и рисунок 3.3) [61, 80, 101, 115].

Было выполнено определение содержания сахаров в водоизвлекаемых веществах, выделившихся при замачивании заполнителя по специальной методике. Влияние экстрагированных компонентов изучали при замесе шлакощелочного вяжущего на водном растворе растворённых веществ с последующим определением предела прочности при сжатии образцов шлакощелочного камня в возрасте 1, 3, 6, 14, 28 и 56 суток методом разрушения на гидравлическом прессе [41, 42, 61, 80, 101, 115].

В работе использовались шлакощелочные вяжущие, разработанные совместно с Исакулов Б. Р. [52, 72, 97, 112], предназначенные для применения в бетонах с органическим заполнителем и обеспечивающие нейтрализацию простых сахаров, а также повышение адгезии камня вяжущего к различным растительным наполнителям, включая стержней кукурузных початков.

Базовые диапазоны составов были определены на основе классических исследований Глуховский В. Д. и диссертационной работы Исакулова Б. Р., тогда как окончательные значения параметров уточнялись по результатам собственного многофакторного эксперимента, выполненного по центральному композиционному плану (раздел 4.1), в котором оптимизация

проводилась по критерию прочности при фиксированной плотности 600–650 кг/м³.

В таблице 3.3 приведены результаты исследования влияния различных вариантов вяжущих и способов их активации на предел прочности при сжатии; ниже представлены составы исследованных вяжущих.

Таблица 3.3. Физико-механические характеристики вяжущих с различными добавками

№ п/п	Вид вяжущего	Предел прочности при сжатии, МПа, сут.					
		1	3	7	14	28	56
1	Вяжущее на ССФШЗУП	15,2	22,1	22,5	24,9	26,1	29,7
2	Портландцемент	14,1	21,0	22,0	22,7	24,0	28,0
3	Шлакощелочные вяжущие с добавками золы-уноса и жидкого стекла	8,3	14,2	15,0	21,0	22,3	24,0
4	Шлакощелочные вяжущие с добавками 3% гипса и золы-уноса	8,2	14,1	14,9	20,7	22,1	23,8
5	Шлакощелочные вяжущие без добавок	5,7	12,1	13,3	17,8	19,1	20,2

Примечание. ССФШЗУП — вяжущее на основе содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и портландцемента. Все составы приготовлены при В/Ц = 0,40–0,45 с учетом активности компонентов и требуемой подвижности смеси. Образцы — балочки 40×40×160 мм; испытание по ГОСТ 10180-2012 на половинках после изгиба.

Составы:

1. Вяжущее на основе ССФШЗУП: гранулированный шлак – 60–65 %; зола-унос – 20–25 %; портландцемент М500 – 10–15 %; содосульфатный активатор ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$) – 3–5 %; жидкое натриевое стекло – 2–5 %.
2. Портландцементное вяжущее: портландцемент М500 – 100 %.

3. Шлакощелочное вяжущее с добавками золы-уноса и жидкого стекла: гранулированный шлак – 70–75 %; зола-унос – 20–25 %; жидкое натриевое стекло – 5 %.
4. Шлакощелочное вяжущее с добавками 3 % гипса и золы-уноса: гранулированный шлак – 72–77 %; зола-унос – 20–25 %; гипс – 3 %.
5. Шлакощелочное вяжущее без минеральных и щелочных добавок: гранулированный шлак – 100 %.

Все составы вяжущих в таблице 3.3 затворялись на двухсуточной водной вытяжке из измельчённых стержней кукурузных початков (см. табл. 3.2). Поэтому прочность контрольного портландцемента снижена по сравнению с паспортными данными (табл. 2.7).

Прочность образцов чистого портландцемента при затворении вытяжкой составила лишь 24,0 МПа, тогда как при использовании чистой воды данный показатель достигал 50,9 МПа, что свидетельствует о выраженном ингибирующем влиянии сахаров, содержащихся в стержнях кукурузных початков.

Анализ результатов, представленных в таблице 3.3, показывает, что использование содосульфатной смеси в качестве щелочного активатора способствует повышению прочности при сжатии по сравнению с составами, затворёнными водой. В возрасте 7 суток прирост прочности составляет около 0,3 МПа, а дополнительное введение жидкого стекла обеспечивает дальнейшее увеличение показателя до 0,4 МПа при аналогичных условиях твердения. Полученные данные указывают на ускорение процессов раннего твердения и более интенсивное формирование структуры шлакощелочного камня.

В таблице 3.4 приведены результаты исследований шлакощелочных лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков, перед которыми представлены составы смесей из расчёта на 1 м³:

Составы:

1. ССФШЗУП: ССФШЗУП – 350 кг; кукурузный наполнитель – 180 кг; вода – 170 л; зола-унос – 30 кг; портландцемент – 50 кг.
2. С портландцементом: ПЦ М500 – 400 кг; кукурузный наполнитель – 160 кг; вода – 200 л.
3. С золой-уноса: ПЦ М500 – 200 кг; гранулированный шлак – 80 кг; жидкое стекло – 70 кг; кукурузный наполнитель – 190 кг; вода – 190 л; зола-унос – 40 кг.
4. С гипсом и золой: ПЦ М500 – 200 кг; гранулированный шлак – 80 кг; жидкое стекло – 70 кг; кукурузный наполнитель – 190 кг; вода – 190 л; зола-унос – 40 кг; гипс – 10 кг.
5. Без добавок: ПЦ М500 – 200 кг; гранулированный шлак – 80 кг; жидкое стекло – 70 кг; кукурузный наполнитель – 200 кг; вода – 190 л.

Сопоставление данных таблиц 3.3 и 3.4 показывает, что комплексное применение содосульфатной смеси, золы-уноса и портландцемента обеспечивает более интенсивный набор прочности в ранние сроки твердения, а также более равномерное формирование структуры шлакощелочного камня. Снижение разброса прочностных показателей свидетельствует о повышении однородности структуры и эффективности нейтрализации водорастворимых компонентов органического наполнителя.

Таблица 3.4. Составы и физико-механические характеристики шлакощелочных лёгких бетонов с различными добавками (на 1 м³ смеси)

№ п/п	Состав бетона	Вяжущее, кг	Кукурузный заполнитель, кг	Вода, л	Минер. Добавки, кг	Плотность, кг/м³	Прочность при сжатии, МПа, сут.					
							1	3	7	14	28	56
1	ССФШЗУП	ССФШЗУП – 350	180	170	зола-унос – 30, ПЦ – 50	1050	1,51	2,11	2,29	2,59	2,97	3,71
2	С портландцементом	ПЦ М500 – 400	160	200	–	1100	1,42	2,11	2,20	2,29	2,41	2,82
3	С золой-уноса	ПЦ М500 – 200, шлак – 80, жид. стекло – 70	190	190	зола-унос – 40	1020	1,31	1,92	2,31	2,40	2,73	2,87
4	С гипсом и золой	ПЦ М500 – 200, шлак – 80, жид. стекло – 70	190	190	зола-унос – 40, гипс – 10	1020	1,43	1,57	1,99	2,39	2,71	2,88
5	Без добавок	ПЦ М500 – 200, шлак – 80, жид. стекло – 70	200	190	–	1000	1,22	1,31	1,73	1,98	2,11	2,52

Примечание. ССФШЗУП включал 55–65 мас.% гранулированного шлака, 15–25 мас.% золы-уноса, 10–15 мас.% ПЦ М500, 4–6 мас.% содосульфатного активатора ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$) и 3–5 мас.% жидкого натриевого стекла (от массы вяжущего). Соотношения варьировали в указанных пределах в зависимости от состава и условий активации. Смеси подбирались с обеспечением удобоукладываемости П1–П2 и максимальной прочности при минимальной плотности. Составы приготовлены с неоптимизированным фракционным составом стержней кукурузных початков (преимущественно 10–30 мм). Оптимизированные результаты после подбора фракции 35–40 мм приведены в табл. 3.12–3.13.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований, представленные в таблицах 3.2–3.4 и рисунке 3.3, подтверждают, что двухсуточная водная экстракция стержней кукурузных початков в сочетании с применением специально разработанных шлакощелочных вяжущих и активирующих добавок позволяет существенно снизить негативное влияние водорастворимых веществ, интенсифицировать процессы структурообразования и обеспечить повышение прочностных характеристик шлакощелочных лёгких бетонов с органическим заполнителем.

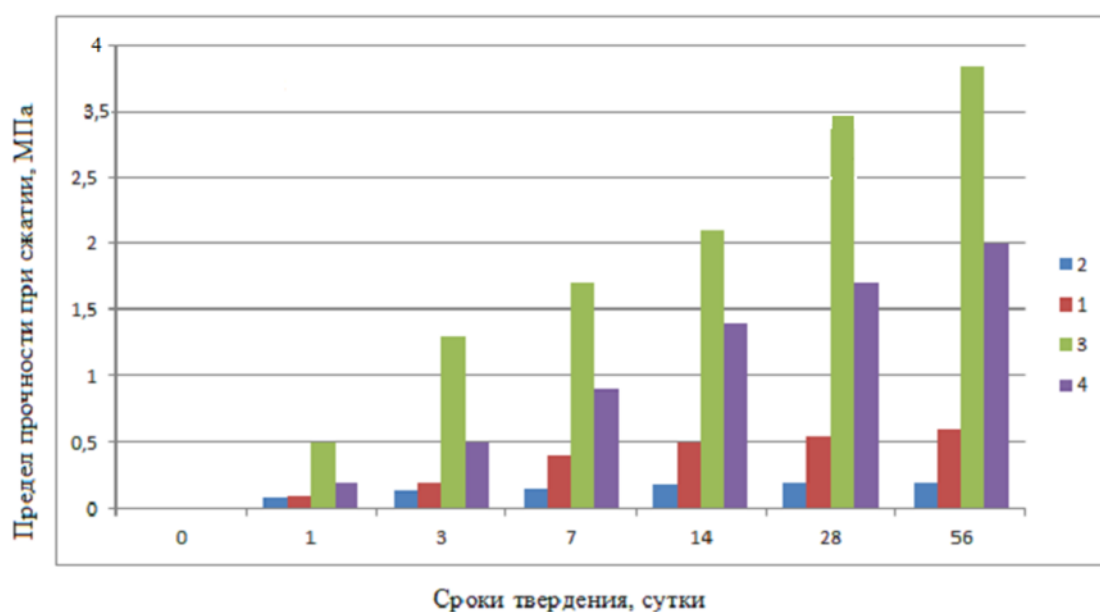


Рисунок 3.3 – Изменение предела прочности при сжатии камня шлакощелочного вяжущего, затворенного на вытяжке из стержней кукурузных початков с комплексными добавками

1 – шлакощелочное вяжущее, затворенное на вытяжке из стержней кукурузных початков с добавками золы-уноса и хлорида кальция; 2 – шлакощелочное вяжущее, затворенное на вытяжке из стержней кукурузных початков с добавками жидкого стекла и хлорида кальция; 3 – шлакощелочное вяжущее, затворенное на вытяжке из стержней кукурузных початков с добавками ССФШЗУП; 4 – шлакощелочное вяжущее, затворенное на вытяжке из стержней кукурузных початков с добавками гипса и хлорида кальция.

Согласно данным таблицы 3.4, образцы шлакощелочного вяжущего, приготовленные на воде, а также с добавкой золы-уноса, продемонстрировали умеренное повышение предела прочности при сжатии на ранней стадии твердения и дальнейшее увеличение прочности к 7-дневному возрасту. Так, прочность образцов на шлакощелочном вяжущем составила 0,3 МПа, а с введением жидкого стекла — 0,4 МПа [57, 60, 97, 115, 116].

На более поздних стадиях твердения прирост прочности незначительный и достигает 0,9 МПа и 1,1 МПа соответственно. Показано, что камень шлакощелочного вяжущего с комплексной добавкой ССФШЗУП (состоящей из содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и портландцемента) имеет повышенную прочность. Так, прочность в 56-дневном возрасте от момента затвердевания смеси составила 2,9 МПа, тогда как добавка гипса показала меньшую прочность — 2,0 МПа [52, 60, 78, 97, 112].

Как показывают данные, при введении в состав шлакощелочного вяжущего композиционных добавок ССФШЗУП (состоящих из содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и портландцемента) их прочность повышается в 10–15 раз и достигает от 2,7 до 3,0 МПа [52, 60, 97, 112].

Основную роль в процессе твердения исследуемых шлакощелочных вяжущих композиций играют сульфат натрия и карбонат натрия щелочного компонента содосульфатной смеси, что обусловлено его химическим составом, поэтому новообразования изучались в системах на основе каждого из этих компонентов [38, 60, 78, 119, 122].

Для ускорения процесса структурообразования в шлакощелочной вяжущей системе введением быстро гидратирующей цементной минеральной добавки — изучение композиции на основе указанных соединений натрия, характеризующихся, как известно, невысокой активностью по отношению к шлаку в условиях естественного твердения — добавлялось 7 %

портландцемента от массы шлака и проводилось пропаривание [38, 60, 78, 112, 115].

Полученные значения послужили основой для дальнейшего направленного подбора гранулометрического состава заполнителя (см. п. 3.5–3.6), позволившего существенно улучшить физико-механические характеристики бетона.

3.4. Исследование влияния стержней кукурузных початков на структуру шлакощелочного вяжущего легкого бетона методами тонкого анализа

Экспериментальные данные рентгенографического и термографического анализа показали образование дополнительных гидратированных соединений при введении добавок ССФШЗУП (содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и портландцемента) в состав шлакощелочного легкого бетона. Это свидетельствует о повышенной активности гидратационных процессов минералов вяжущего, что подтверждает положительное влияние вышеуказанных добавок на структуру и прочностные характеристики бетона [6, 49, 52, 65, 97, 112].

В рентгенограмме бетона на основе стержней кукурузных початков с добавками ССФШЗУП выделяются характерные рефлексy низкоосновного гидросиликата кальция тоберморитовой группы, проявляющиеся в области малых углов рассеяния ($\approx 7\text{--}12^\circ 2\theta$) и в диапазоне средних углов ($\approx 22\text{--}29^\circ 2\theta$), что соответствует межплоскостным расстояниям $d \approx 1,1\text{--}1,2$ нм и $d \approx 0,30\text{--}0,31$ нм. Наличие этих дифракционных линий подтверждает формирование аморфно-кристаллической C–S–H-фазы, типичной для тоберморитоподобных структур, являющейся основным продуктом гидратации и обеспечивающей прочностные свойства композита (рисунок 3.4) [6, 26, 49, 52, 112].

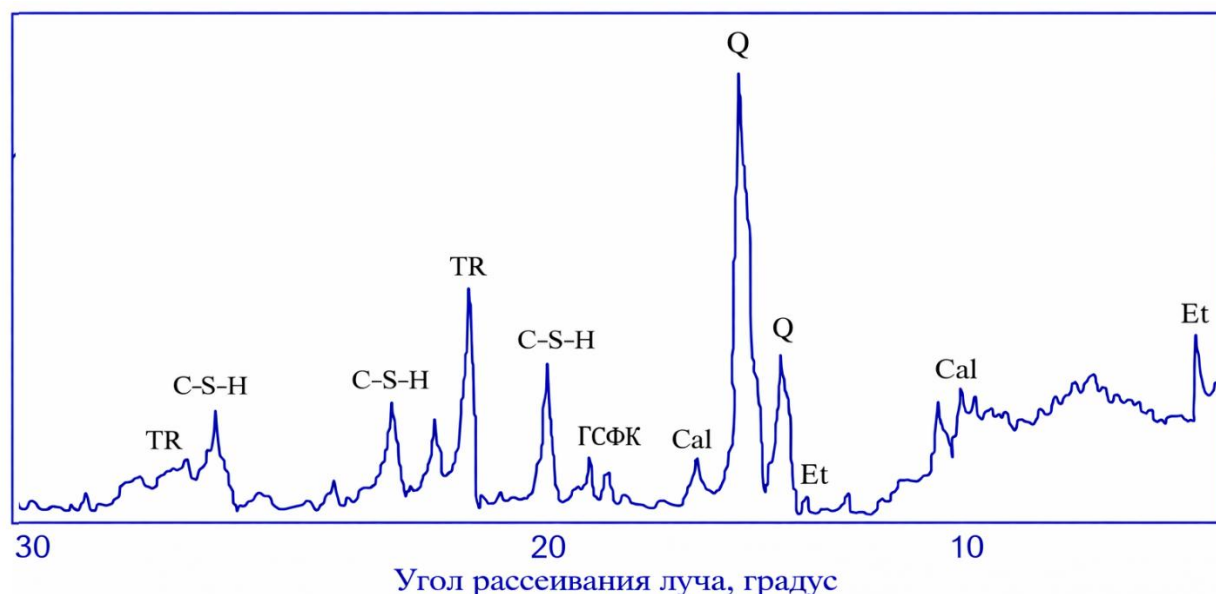


Рисунок 3.4 – Рентгенограмма бетона на основе стержней кукурузных початков со смешанными добавками (ССФШЗУП), состоящими из содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и 7% портландцемента от массы шлака. *Условные обозначения фаз:* TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфогидроксид кальция; Et — этtringит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3)

На рентгенограмме легкого бетона на основе стержней кукурузных початков со смешанной добавкой (ССФШЗУП), включающей содосульфатную смесь, фосфорный шлак, золу-унос и 3% портландцемента от массы шлака, (рисунок 3.5) наблюдаются характерные дифракционные рефлексы низкоосновного гидросиликата кальция тоберморитовой группы. Основные пики тоберморита проявляются при углах рассеивания около $7,0$ – $8,0^\circ$, $11,7$ – $12,0^\circ$, $18,0$ – $18,5^\circ$ и $28,0$ – $29,0^\circ$ 2θ , что свидетельствует о формировании кристаллической структуры гидросиликата кальция в матрице легкого бетона и подтверждает гидратацию цементного компонента в присутствии минеральных добавок. Эти рефлексы указывают на образование высокоактивного связывающего вещества, отвечающего за прочность и долговечность композита [6, 26, 49, 52, 112].

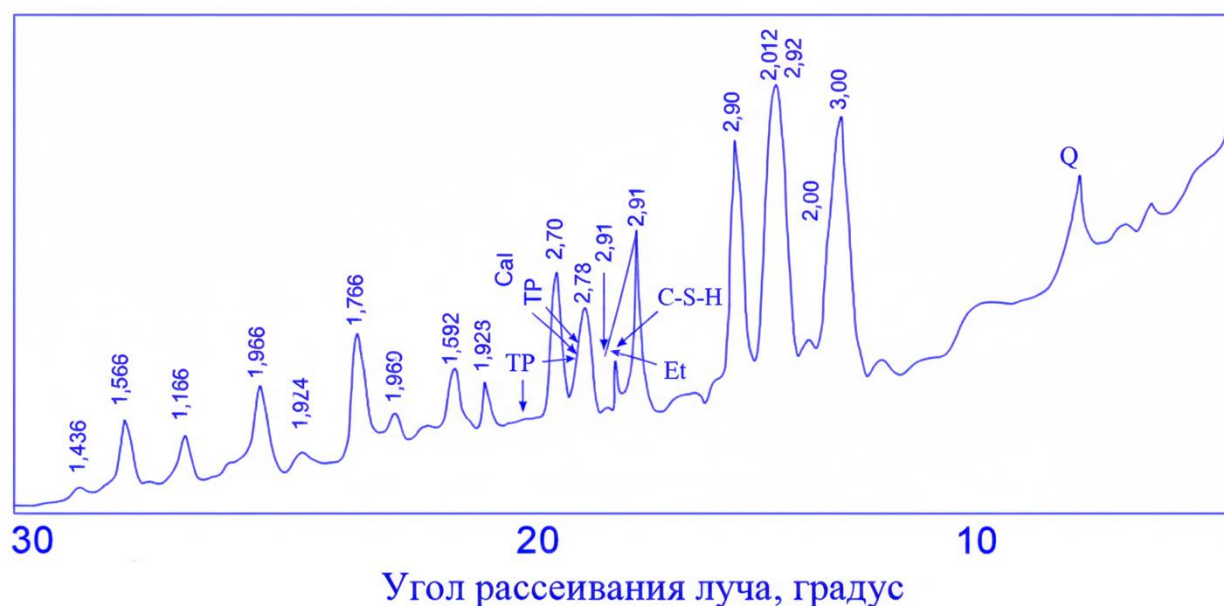


Рисунок 3.5 – Рентгенограмма образца легкого бетона на основе стержней кукурузных початков со смешанной добавкой (ССФШЗУП), состоящей из содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и портландцемента в количестве 3% от массы шлака. *Условные обозначения фаз:* TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфогеррит кальция; Et — эттрингит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3)

Анализ рентгенограмм образцов легкого бетона на основе стержней кукурузных початков на шлаковом щелочном вяжущем, состоящем из золы-уноса и жидкого стекла (рисунок 3.6), и на основе стержней кукурузных початков на шлаковом щелочном вяжущем с золой-уносом Радиографический анализ образцов легкого бетона на золе и портландцементе (рисунок 3.6) показывают, что они существенно отличаются друг от друга. Действительно, с одной стороны, обе сравниваемые рентгенограммы сходны, обе содержат фазовые линии кристаллического новообразования, свидетельствующие о высокосульфатной форме гидросульфогеррита кальция [6, 26, 57, 60, 116].



Рисунок 3.6 – Рентгенограмма легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на портландцементе с добавками золы-уноса и жидкого стекла. Условные обозначения фаз: TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфферрит кальция; Et — этtringит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3)

С другой стороны, рентгенограмма на рисунке 3.5 показывает более интенсивное формирование гидросиликатов кальция C–S–H тоберморитовой группы (пики $2\theta \approx 7\text{--}10^\circ$ и $15\text{--}20^\circ$) и присутствие щелочных алюмосиликатов ($20\text{--}30^\circ$), тогда как рентгенограмма на рисунке 3.6 характеризуется преобладанием аморфной C-(A)-S-H фазы и менее выраженными кристаллическими рефлексамми; это указывает на то, что гидратационные процессы в образцах на портландцементе с золой-уносом и жидким стеклом (рисунок 3.6) протекают значительно интенсивнее, чем в шлакощелочных образцах (рисунок 3.7) [6, 26, 49, 60, 116].



Рисунок 3.7 – Рентгенограмма легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на шлакощелочных вяжущих с добавками золы-уноса и 3% портландцемента. Условные обозначения фаз: TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфферрит кальция; Et — этtringит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3)

Из этого следует, что добавки к шлакощелочному вяжущему интенсифицируют процесс гидратации, усиливая образование аморфной C-(A)-S-H фазы и способствуя более активному формированию щелочных алюмосиликатов, что подтверждается увеличением аморфного фона и характерных рефлексов на рентгенограмме. На рисунках 3.7 и 3.8 приведены рентгенограммы легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на шлакощелочных вяжущих с добавками 3% гипса и золы-уноса и без них [6, 26, 57, 60, 97].

Введение 3% гипса и золы-уноса в шлакощелочное вяжущее на основе стержней кукурузных початков приводит к кардинальному изменению фазового состава продуктов гидратации, что наглядно демонстрируется результатами рентгенофазового анализа (рисунок 3.8, 3.9). В контрольном составе (без добавок) идентифицируются характерные рефлекс

кристаллического портландита Ca(OH)_2 с межплоскостным расстоянием $d \approx 4,83 \text{ \AA}$. В модифицированном составе данный рефлекс отсутствует, что свидетельствует о полном связывании свободного Ca(OH)_2 . Вместо этого на рентгенограмме появляется серия новых дифракционных максимумов ($d \approx 3,73\text{--}3,79 \text{ \AA}$, $2,79 \text{ \AA}$, $2,61 \text{ \AA}$), однозначно соответствующих фазе этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Таким образом, добавки выступают как сульфатно-алюминатные активаторы, смещающие процесс структурообразования от накопления Ca(OH)_2 к синтезу этtringита, что является ключевым фактором повышения плотности и ранней прочности композита [6, 17, 26, 57, 60, 116].

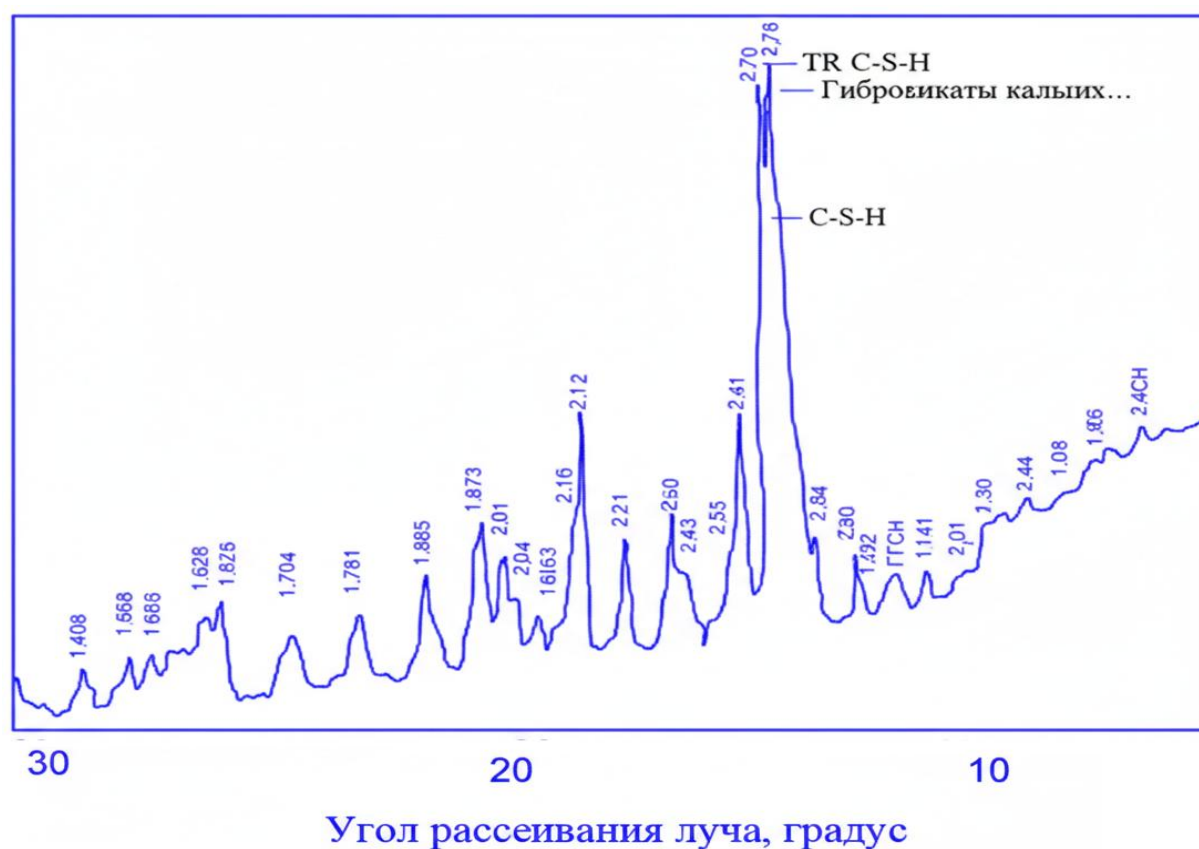


Рисунок 3.8 - Рентгенограмма легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на шлакощелочных вяжущих с добавками 3% гипса и золы-уноса. Условные обозначения фаз: TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфферрит кальция; Et — этtringит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3)



Рисунок 3.9– Рентгенограмма легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на шлакощелочных вяжущих без добавок. *Условные обозначения фаз:* TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфферрит кальция; Et — этtringит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3)

Наличие портландита в контрольном составе и его отсутствие вместе с образованием этtringита в модифицированном составе свидетельствуют о том, что добавки гипса и золы-уноса не просто ускоряют гидратацию, а кардинально меняют её механизм, запуская сульфатно-алюминатную активацию и приводя к формированию более плотной этtringитовой матрицы [6, 17, 26, 57, 60].

На рисунках 3.10 и 3.11 приведены рентгенограммы легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на шлакощелочных вяжущих с добавками 7 % портландцемента и золы-уноса и без них. Сравнение рентгенограмм образцов показывает их отличие друг от друга [6, 57, 60, 97].



Рисунок 3.10. – Рентгенограмма легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков шлакощелочных вяжущих композиции с добавками 7% портландцемента и золы-уноса. Условные обозначения фаз:

TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфогеррит кальция; Et — этtringит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3).

Сравнительный анализ рентгенограмм контрольного состава (рисунок 3.10) и состава с добавками 7% портландцемента и золы-уноса (рисунок 3.9) выявляет принципиальные различия в фазообразовании. В контрольном образце фиксируется интенсивный рефлекс гидроксида кальция (портландита, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) с межплоскостным расстоянием $d \approx 4,83 \text{ \AA}$. В модифицированном составе данный рефлекс отсутствует, что свидетельствует о полном связывании свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в результате пуццолановой реакции с золой-уносом и гидратации портландцементных зерен.

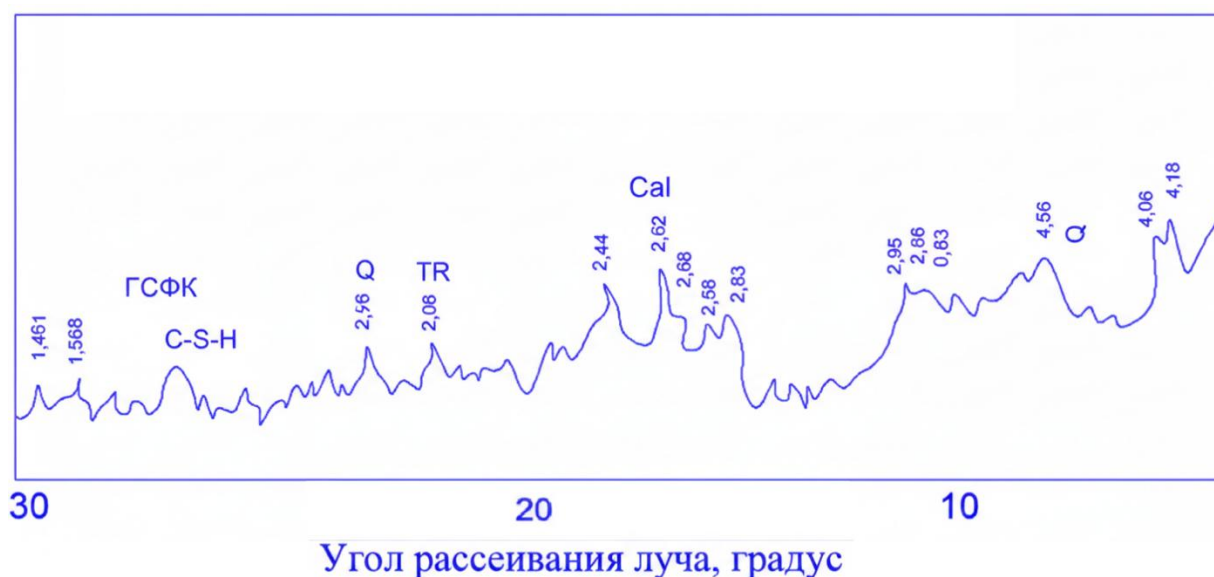


Рисунок 3.11. – Рентгенограмма легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков без добавок. *Условные обозначения фаз:* TR — тоберморит; C–S–H — гидросиликаты кальция; ГСФК — гидросульфогеррит кальция; Et — эттрингит; Q — кварц (SiO_2); Cal — кальцит (CaCO_3)

Вместе с тем, на рентгенограмме образца с добавками (рисунок 3.9) появляются слабоинтенсивные отражения в области $d \approx 3,65 \text{ \AA}$ и $2,76\text{--}2,88 \text{ \AA}$, которые могут быть атрибутированы фазе эттрингита. Однако их низкая интенсивность по сравнению с образцом, активированным гипсом (рисунок 3.8), указывает на незначительное его образование. Таким образом, основным эффектом от введения комбинации портландцемента и золы является не сульфатная активация с массовым образованием эттрингита, а пуццолановое потребление извести и формирование дополнительного C–S–H геля, что способствует уплотнению структуры [6, 17, 26, 51, 57, 60].

Данные рентгенофазового анализа подтверждаются термографическим анализом. Эндотермические и экзотермические эффекты, видимые на термограммах при 325 К, 460 К, 800 К и 825 К, соответствуют удалению гидратационной воды и кристаллизации псевдо-борастонита и волластонита (рисунок 3.12) [6, 26, 49, 65, 84].

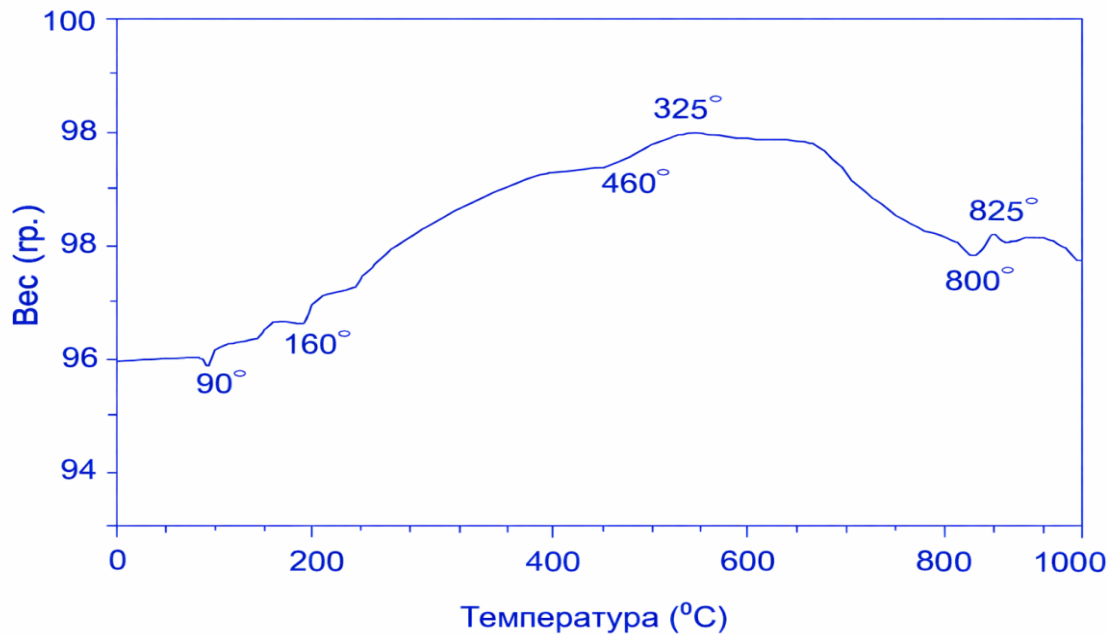


Рисунок 3.12 – Термограмма образца легкого бетона на основе стержней кукурузных початков со смешанной добавкой (ССФШЗУП), состоящей из смеси сульфата натрия, фосфорного шлака, золы-уноса и 7% портландцемента от массы шлака

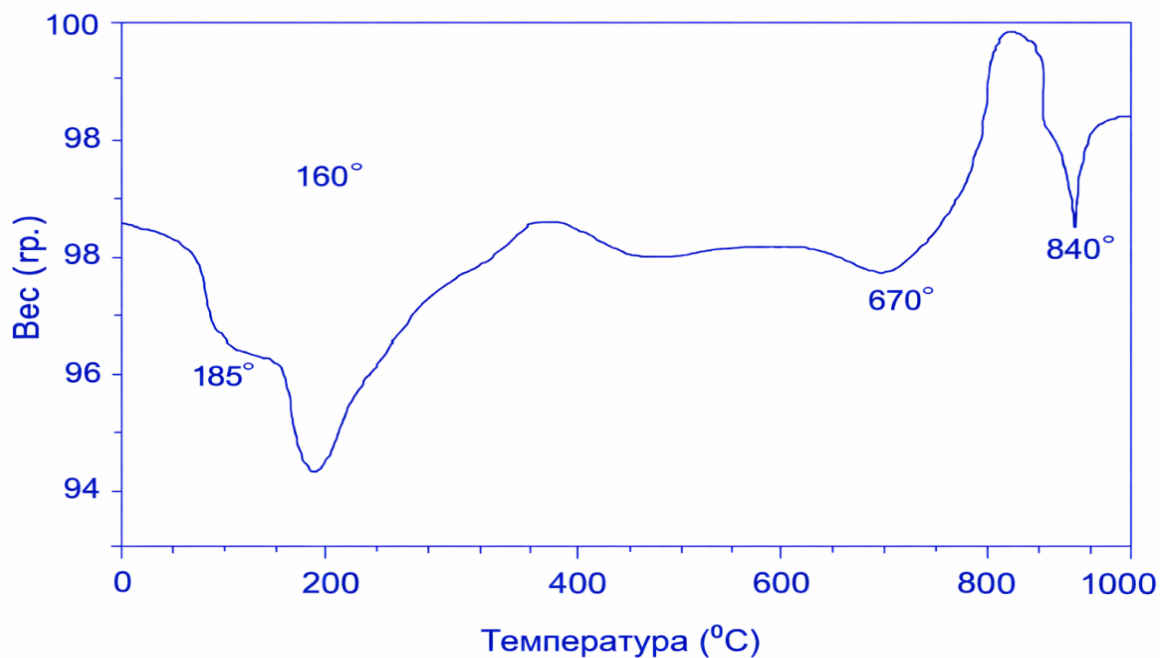


Рисунок 3.13. – Термограммы легкобетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на шлакощелочных вяжущих с добавками золы-уноса и 3% портландцемента

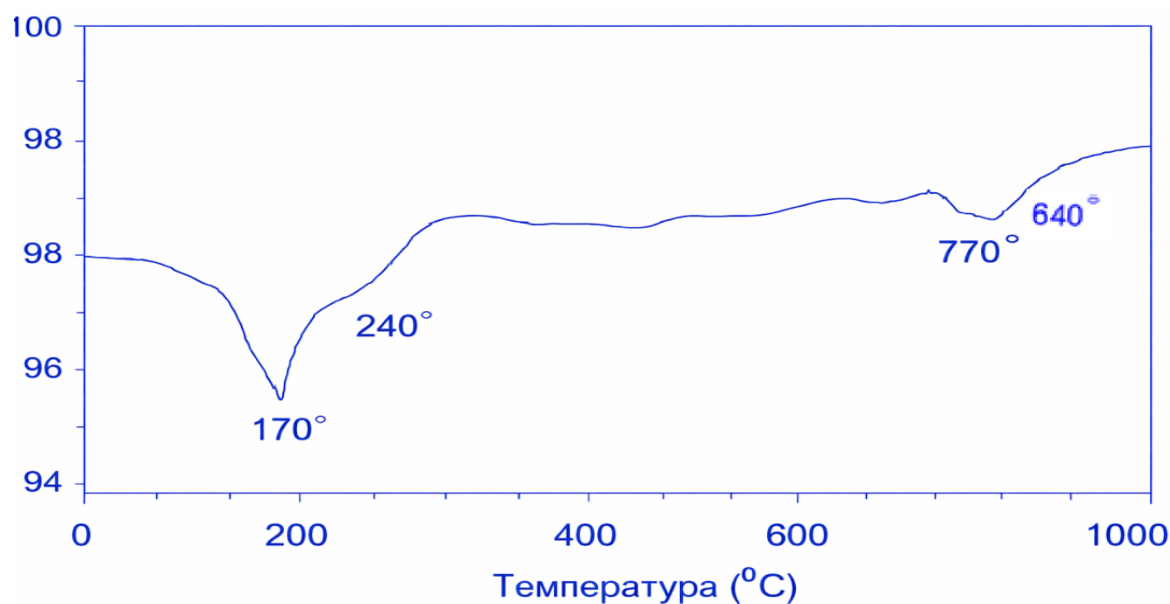


Рисунок 3.14 – Термограмма легкого бетонных образцов на основе стержней кукурузных початков на шлакощелочных вяжущих с добавками 3% гипса и золы-уноса

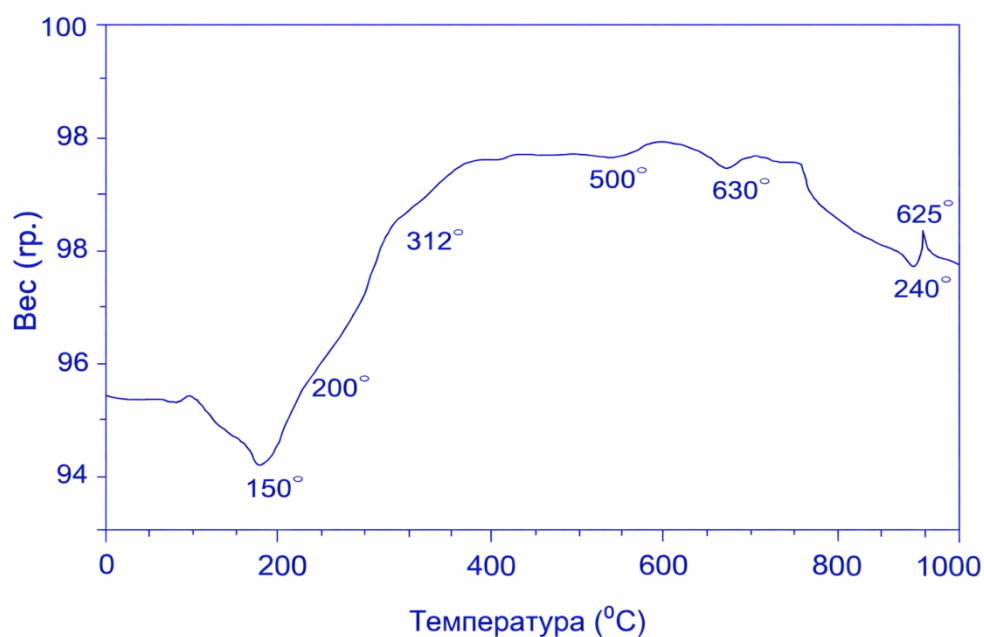


Рисунок 3.15 – Термограмма легкого бетонных образцов на основе стержней кукурузных початков без добавок

О присутствии указанных новообразований, в том числе трускоттита, свидетельствуют также характерные для них эндо- и экзотермические эффекты (рисунки

3.12 и 3.13), что подтверждает вяжущие свойства композиции. Об этом также свидетельствуют эндо- и экзотермические эффекты при температурах 670 и 840 К, соответствующие обезвоживанию гидросиликатов кальция [6, 26, 49, 65, 84].

На рисунках 3.14 и 3.15 представлены термограммы легкобетонных образцов, характеризующие потерю массы при нагреве до 1000°C. Для образцов с добавками (рисунок 3.14) выделяются основные стадии: удаление влаги и дегидратация гипса и вяжущего в интервале примерно 170–240°C, окисление органических компонентов стержней кукурузных початков, а также разложение карбонатов при высоких температурах (около 640–770°C). Общая потеря массы составляет порядка 17–20%, что соответствует типичной термической стабильности подобных композитов и отражает характерное поведение их компонентов [6, 26, 49, 65, 84].

В образцах без добавок (рисунок 3.15) наблюдается более резкая и ранняя потеря массы, начинающаяся уже при ~150°C за счёт дегидратации. Значительная потеря массы (~6%) происходит в диапазоне 240–312°C, что связано с интенсивным окислением и разложением органики стержней кукурузных початков. Высокотемпературное разложение карбонатов фиксируется при примерно 620–630°C. Общая потеря массы к 1000°C составляет около 10%, что существенно ниже, чем у образцов с добавками, и указывает на отличия в структуре и составе продуктов гидратации, а также, возможно, на меньшее содержание термолабильных компонентов, таких как карбонаты, в данной рецептуре [6, 26, 49, 60, 65].

Исследование микроструктуры легкобетонных образцов, изготовленных на основе стержней кукурузных початков и дополненных смешанными добавками (включающими содосульфатную смесь, фосфорный шлак, золунос и 7 % портландцемента от массы шлака), показало, что в цементной матрице наблюдается плотное распределение стержней кукурузных початков [6, 56, 63, 98, 112].



Рисунок 3.16. Микроструктура легкого бетона на основе стержней кукурузных початков со смешанными добавками (ССФСЗУП), состоящими из содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и 7 % портландцемента от массы шлака

На рисунке 3.16 светлые области неправильной, часто вытянутой формы представляют собой интегрированные частицы стержней кукурузных початков или поры, оставшиеся на их месте. Видно, что эти включения равномерно распределены в темной цементной матрице, а на границах раздела отсутствуют трещины и отслоения, что свидетельствует об их хорошей интеграции и сцеплении с композитом [6, 47, 56, 63, 98].

3.5. Подбор гранулометрического состава, вида и формы стержней кукурузных початков при измельчении для получения легкого бетона на основе стержней кукурузных початков

3.5.1. Подбор оборудования для измельчения стержней кукурузных початков при использовании их в составе шлакощелочных легких бетонов

Приготовление оптимального фракционного состава стержней кукурузных початков для производства легких бетонов на основе

растительного сырья связано с отсутствием специального дробильно-сортировочного оборудования для этого вида растительного сырья. Поэтому необходимо выбирать оборудование из дробилок и измельчителей соломы, которые использовались для других целей в сельскохозяйственных перерабатывающих комплексах. В ходе исследования было протестировано различное дробильно-измельчительное оборудование [20, 24, 64, 79, 114].

Существует множество видов оборудования для измельчения материалов. У каждого из этих видов оборудования имеются свои достоинства и недостатки, соответственно, для каждого конкретного технологического решения лучшим образом будут подходить разные варианты оборудования [20, 24, 64, 79].

Для определения типа дробильно-измельчительного оборудования для измельчения кукурузы были опробованы несколько видов измельчительных машин и оборудования, используемых в агропромышленном комплексе в странах СНГ [20, 24, 79, 91, 114].

В таблице 3.5 приводятся различные виды измельчительных приборов и оборудования, используемых при производстве шлакощелочных легких бетонов на основе растительного сырья [20, 24, 64, 79].

Таблица 3.5. Различные виды измельчительных приборов и оборудования для производства легких бетонов на основе растительного сырья

№ п/п	Наименование агрегатов
1	Молотковые дробилки ДМ-1
2	ДМ-2 (без сита)
3	ДКУ-М
4	ДКУ-М (со снятыми решетками)
5	Измельчительная машина Tazz - K32)
6	РСС-6
7	Измельчитель стебли хлопчатника

В таблице 3.6 представлен фракционный состав различного растительного сырья, используемых для производства легких бетонов на основе стержней кукурузных початков [20, 24, 64, 79].

Таблица 3.6. Фракционный состав стержней кукурузных початков, измельчённых с помощью различного оборудования

Наименование агрегатов	Частные остатки, (%) на ситах с размером ячеек, мм								
	10	7	5	3	2	1	0,5	0,25	Менее 0,25
Дробилка ДМ-1	27,2	12,9	19,0	21,9	9,0	7,0	1,0	1,2	0,8
Дробилка ДМ-2 (без сита)	62,9	22,7	9,3	3,6	0,6	0,6	0,3	--	—
Дробилка ДКУ-М	10,0	12,0	15,3	2,0	15,3	18,4	1,8	5,0	2,6
ДКУ-М (со снятыми решетками)	29,2	16,2	15,7	13,6	14,4	6,0	1,7	2,0	1,2
Измельчительная машина Tazz - K32)	29,5	16,5	16,1	13,9	14,9	6,2	1,9	2,1	1,3

Из данных таблицы видно, что наиболее приемлемой машиной, обеспечивающей оптимальную долю стержней кукурузных початков, является измельчитель Tazz K32 с удалённой решёткой для контроля степени измельчения. Это мощная машина, которая работает от бензинового двигателя. Конструкция преимущественно металлическая, что обеспечивает прочность и стойкость к механическим повреждениям. Аппарат хорошо подходит для измельчения сухих кукурузных початков [20, 24, 64, 79].

Были проведены исследования по определению насыпной плотности стержней кукурузных початков, измельчённых на машине марки Tazz K32 со снятыми решётками. Результаты опытных работ при 12 % влажности стержней кукурузных початков приведены в таблице 3.6 [43, 61, 64, 79].

Насыпная плотность стержней кукурузных початков (таблица 3.7), измельчённых в разных фракциях, определялась взвешиванием в пятикратной повторности свободного насыпного веса стержней кукурузных початков.

Таблица 3.7. Насыпная плотность стержней кукурузных початков при влажности 12 % для различных фракций помола.

Материал	Размер фракции						
	40 мм	30 мм	20 мм	1,25 мм	0,63 мм	2,5 мм	2,-3 мм
Насыпная плотность, кг/м ³	170	190	170	250	110	162	165

Полученные результаты по насыпной массе стержней кукурузных початков позволяют использовать данные экспериментального исследования для дальнейших работ [41, 42, 43, 64, 79].

3.5.2 Подбор гранулометрического состава и влажности стержней кукурузных початков

Существуют общие закономерности в физико-механических свойствах самых разнообразных видов растительного сырья (кукурузные початки, тростник, конопляная костра, стебли винограда, лубяные растения, рисовая солома, рисовая и подсолнечная шелуха, стебли хлопчатника) стран Центральной Азии, которые в достаточном количестве представлены в научной литературе и источниках. Как видно из предыдущих глав, одним из наиболее распространённого сырья агропромышленных парков Казахстана являются стержней кукурузных початков, и утилизация этого компонента в составе лёгких бетонов является важной частью строительной отрасли республики [6, 18, 54, 53, 67, 98, 123].

Насыпная плотность относится к основным физическим свойствам растительного материала, и её свойства как органического заполнителя для лёгкого бетона оказывают значительное влияние на прочностные характеристики. В таблице 3.7 приведена насыпная плотность нескольких растительных материалов после полного высыхания. Насыпная плотность растительного материала зависит от плотности сырого растительного

материала, формы и размера частиц, размера контейнера и метода заполнения [43, 54, 64, 79, 98].

Из литературных источников известно, что водорастворимость стержней кукурузных початков и древесных материалов обусловлена комплексом органических соединений. Вследствие биологических и климатических воздействий содержание водорастворимых веществ в кукурузе уменьшается по мере созревания стержней кукурузных початков (таблица 3.8) [16, 61, 80, 101, 115].

Таблица 3.8. Насыпная плотность сельскохозяйственного сырья и дикорастущих однолетников

№ п/п	Растительное сырье	Насыпная плотность, кг/м ³
1	Стержни кукурузных початков	110 - 120
2	Лузга подсолнуха	90 - 100
3	Тростники камыша	110 - 130
4	Стебли хлопчатника	110 - 120
5	Рисовая лузга	110 - 115
6	Костры конопли	130 - 140

Значение насыпной плотности стержней кукурузных початков зависит от содержания влаги в растительном теле, степени измельчения, а также от условий развития растений, почвы и хранения [16, 61, 64, 79, 91].

Согласно результатам исследований, насыпная плотность органических наполнителей, содержащих измельчённые фракции от 0,5 мм до 1,0 мм, составляет от 225 до 197 кг/м³ при влажности 10 %; насыпная плотность высушенного сырья, содержащего фракции от 1,0 до 5,0 мм, достигала 170 кг/м³, а насыпная плотность (сухих) изготовленных фракций кукурузы составляла от 102 до 143 кг/м³, в зависимости от фракции [54, 61, 64, 95].

Влажность и химический состав стержней кукурузных початков также зависит от времени сбора урожая и от сроков его хранения (таблицы 3.9, рисунок 3.17)

Таблица 3.9. Изменение химического состава и влажности стержней кукурузных початков, % по массе, в зависимости от времени сбора урожая

Время сборки урожая и изъятия пробы	Влаж- ность	Химический состав, %					
		Легкогидро- лизуемые вещества	Трудно- гидролизуе- мые вещества	Раство- римые в воде про- дукты	Лигнин	Зольность	Другие
Ноябрь	64,7-65,1	15,9-16,3	31,6-32,1	14,9-15,3	20,4-21,1	8,6-8,9	8,3-8,9
Март	23,9-24,2	16,2-17,1	33,7-34,1	10,6-11,2	29,9-30,5	5,7-6,1	1,3-1,8
Июль	9,14-9,3	17,0-17,4	31,9-32,3	3,6-4,2	30,1-30,6	3,1-3,5	6,7-7,0

Данное исследование показывает, что при хранении стержней кукурузных початков на открытом воздухе из-за климатических воздействий происходит переход водорастворимых компонентов в нерастворимые формы (таблица 3.9) [61, 80, 101, 115]. Установлено, что длительное хранение стержней кукурузных початков на открытом воздухе вызывает ферментативный гидролиз полисахаридов растительных клеток. Хотя хранение растительного сырья положительно влияет на их переработку, длительный процесс их ферментации не рентабелен с технологической точки зрения [16, 91, 111, 121].

Органические наполнители также гигроскопичны, и когда они поглощают влагу, древесина расширяется с сопутствующим давлением расширения. При впитывании воды в клеточную оболочку происходит набухание и одновременно увеличивается объём. При расчёте состава легкого бетона на основе растительного сырья учитывается набухание целлюлозоорганических наполнителей [4, 46, 61, 66, 87].

Стержни кукурузных початков в основном характеризуются более однородной складчатой структурой. Это подтверждает сходство химического состава и структуры стержней кукурузных початков и древесного вторичного сырья, что позволяет использовать ключевые свойства древесных наполнителей для рыхлоструктурированных стержней кукурузных початков [46, 61, 63, 70, 87].

С середины весны, начиная с мая, влажность стержней кукурузных початков быстро падает, достигая постоянного значения от 15 % до 9 % в последующие месяцы, и только с наступлением осени и повышением относительной влажности стержни кукурузных початков начинают изменять влажность. Влажность материала меняется, начинает подниматься [16, 111, 121].



Рисунок 3.17. Изменение влажности стержней кукурузных початков в зависимости от времени и вида хранения

В среднем влажность стержней кукурузных початков в воздушно-сухом состоянии находится в пределах 10–12 %, а в сухом помещении — в пределах 8–10 % (рисунок 3.17). Что касается влажных стержней кукурузных початков,

то содержание влаги в них очень высокое и сильно варьируется в зависимости от времени года и влажности окружающего воздуха [16, 111, 121].

Для подбора состава легких бетонов необходимо определить водопоглощение пористого органического наполнителя и его влияние на свойства композита. Для этого проводился анализ водопоглощения стержней кукурузных початков ходов. В работе использовали образцы стержней кукурузных початков размерами 30–40 мм и для сравнения стержни кукурузных початков размером 10, 15, 20, 19, 30, 35 и 40 мм. По стандартной методике образцы были предварительно взвешены, полностью погружены в воду и удерживались под силовым агрегатом. Периодически образцы извлекали из воды, сушили на фильтровальной бумаге, взвешивали и рассчитывали среднее водопоглощение отдельно для каждого диаметра.

Анализ показал, что водопоглощение образцов разного диаметра в воде в течение 24 часов при температуре 20 °С составляет: 10 мм — 69,2 %, 15 мм — 70,1 %, 20 мм — 71,1 %, 25 мм — 67,9 %, 30 мм — 68,1 %, 35 мм — 65,3 %, 40 мм — 63,5 %. Как видно из приведенных данных водопоглощение стержней кукурузных початков лежит в пределах нормативов для легкого бетона и позволяет использовать их для производства конструкционных строительных материалов [63, 95, 126].

Технология производства легких бетонов на основе растительного сырья со щелочно-шлаковым вяжущим имеет много преимуществ по сравнению с применением цемента. В отличие от легких бетонов на портландцементе, в шлакощелочных легких бетонах на основе растительного сырья могут использоваться древесная щепа не только хвойных, но и лиственных пород, которые могут содержать кору [38, 53, 68, 78, 82, 108, 119].

При использовании шлакощелочных вяжущих растворов в составе легких бетонов отпадает необходимость предварительной обработки всех видов целлюлозных органических заполнителей минерализаторами, обязательной при применении в качестве вяжущего портландцемента [38, 67, 78, 92, 108, 122].

Это объясняется высокой щелочностью шлакощелочного вяжущего раствора, которая нейтрализует отрицательное влияние присутствующих в древесных и других растительных органических заполнителях водорастворимых веществ и, тем самым, позволяет получать строительные материалы и конструкции с достаточно высокими строительно-техническими и эксплуатационными характеристиками [38, 56, 78, 92, 108, 122].

В результате получается строительный материал или изделие, обладающее определённой прочностью легкого бетона. Однако такой обработки недостаточно для нейтрализации действия водорастворимых компонентов сырых кукурузных початков. Замачивание выдержанных стержней кукурузных початков может дополнительно увеличить прочность легкого бетона на основе стержней кукурузных початков на 15–30 % [56, 98, 112].

Учитывая все факторы, доказанные методы и методики предшественников при изготовлении легких бетонов на основе растительного сырья, в исследованиях мы решили использовать методы замачивания стержней кукурузных початков и удаление водоекстрактивных веществ водной вытяжкой. Известно замачивание растительного сырья на 15 минут. Выдерживание стержней кукурузных початков до 24 часов и удаление водоизвлекаемых компонентов улучшают показатель прочности легкого бетона [46, 56, 98, 112].

Высвобождение водорастворимых веществ из стержней кукурузных початков в процессе мацерации начинается в момент добавления воды и проявляется в виде тёмного цвета водного экстракта и образования коллоидной дымки из мелких частиц в суспензии стержней кукурузных початков. Их размер варьируется от 5 до 30 микрон [23, 48, 63, 98].

Как показывают наши исследования, водорастворимые вещества в стержнях кукурузных початков практически не влияют на начальное формирование шлакового щелочного камня. Было установлено, что прочность

шлакового щелочного камня снижается, если образцы твердеют в воздушно-сухом состоянии [56, 72, 97, 112, 124].

3.6. Влияние фракции стержней кукурузных початков на физические и физико-механические свойства легкого бетона

Основным требованием при выборе состава легкого бетона на основе стержней кукурузных початков являлось получение заданных значений средней плотности и прочности при сжатии образцов при минимально возможном расходе шлакощелочных вяжущих [62, 95, 98, 109, 126].

Для определения оптимального фракционного состава стержней кукурузных початков при производстве легких бетонов проведены экспериментальные исследования на образцах с различными размерами частиц органического заполнителя (длина измельчённых стержней кукурузных початков 10, 20, 30 и 40 мм) шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков [63, 95, 98, 109, 126].

Исследования влияния стержней кукурузных початков на физико-механические свойства легкого бетона проводились по следующей технологической схеме. Стержни кукурузных початков 2021 г. урожая, хранившиеся на открытом воздухе, имеющие влажность 8 % по массе, подвергали дроблению на измельчительной машине марки Tazz K32, затем измельчённые частицы стержней кукурузных початков просеивали на стандартном решето-сите с размерами отверстий: 10 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм, 30 мм, 35 мм, 40 мм. Затем определяли фракционный состав измельчённых стержней кукурузных початков на стандартных ситах с отверстиями 40 мм, 20 мм, 10 мм, 5 мм, 2,5 мм и менее 2,5 мм % по массе [20, 64, 95, 98, 126].

У измельчённых стержней кукурузных початков определяли плотность и водопоглощение на лабораторных приборах и оборудовании по стандартной методике.

Одним из основных факторов, влияющих на физические свойства молотых стержней кукурузных початков, является содержание влаги и состав у органических заполнителей частиц корки. Физические свойства и фракционный состав измельчённых стержней кукурузных початков приведены в таблицах 3.9 и 3.10 [41, 64, 95, 98, 126].

Из таблиц 3.10 и 3.11 видно, что измельчение стержней кукурузных початков в 6-й и 7-й пробах с влажностью от 65 до 70 % масс. привело к укрупнению органической фракции заполнителя. Для образца 2,5, содержащего фракции 35–40 мм, степень вытеснения составила 91–92 %, для более мелких фракций 2,5 мм и менее она была значительно снижена на 7 % [21, 64, 95, 98, 126].

Таблица 3.10. Физические свойства измельчённых стержней кукурузных початков

№№	Решета с диаметром отверстий, мм	Плотность органического заполнителя, кг/м ³	Водопоглощение за 15 мин., по % массе	Содержания органического заполнителя, % по массе	
				Корки кукурузных початков	Влажность
1	10	130-150	180	20-25	8
2	15	120-130	190	20-25	8
3	20	110-115	200	17-20	8
4	25	105-108	170	16-17	50
5	30	101-105	175	10-12	60
6	35	97-103	160	8-10	65
7	40	100-110	210	6-9	70

Таблица 3.11 Фракционный состав измельченных стержней кукурузных початков

№№	Решета с диаметром отверстий, мм	Частные остатки на стандартных ситах, % по массе					
		40	20	10	5	2,5	Менее 2,5
1	10	-	-	2-4	26-29	38-42	38
2	15	-	5-7	5-9	36-40	27-41	37
3	20	2-3	7-8	10-15	46-48	21-27	20
4	25	8-15	6-8	9-13	36-38	22-25	21
5	30	17-25	7-9	20-23	21-25	12-17	7-9
6	35	27	9	15	29	19	7
7	40	30	18	11	21	20	7

Результаты испытаний также показали, что стержни кукурузных початков влажностью 7 % от массы в пятой пробе образцов (фракция 40 мм) составляют 17–25 % массы, а (менее 2,5 мм) — 7–9 % массы. Таким образом, для дальнейшего исследования были выбраны образцы дроблёных стержней кукурузных початков с размерами 30, 35 и 40 мм.

Процесс замачивания органического заполнителя очищает его поверхность от измельченных частиц, коры, хвои и листовых примесей, образующихся при измельчении стержней кукурузных початков, и других загрязнений, ухудшающих состояние заполнителя [4, 46, 63, 87, 98].

Исследования влияния фракции измельчённых стержней кукурузных початков на свойства изучаемого легкого бетона показали, что при использовании в легком бетоне на основе стержней кукурузных початков, органического заполнителя с большим содержанием крупных фракций от 30 до 40 мм средняя плотность легкого бетона изменяется незначительно, при этом прочность его повышается очень существенно и в 28-суточном возрасте достигает 3,5–4,5 МПа [63, 95, 98, 109, 126].

Для проведения исследования определяли активность композиционных шлакощелочных вяжущих растворов методами испытания по ГОСТ 10180–2012. Стандартные образцы размером 100×100×100 мм изготавливались из шлакощелочной легкогобетонной смеси (композиционные шлакощелочные вяжущие растворы: измельчённые стержни кукурузных початков) при растворо-заполнительном отношении $P/Z = 1,4$ с последующим твердением в течение 28 суток в нормальных условиях при температуре $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$. Прочность шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков измеряли на гидравлическом прессе [15, 41, 95, 98, 126].

Часть образцов была помещена в пропарочную камеру при температуре $80 \pm 5^\circ\text{C}$ для ускорения процесса твердения. Предел прочности образцов при сжатии проверяли через 1, 3, 7, 11, 22, 60, 180, 360 и 720 дней после тепло-влажностной обработки [15, 41, 95, 98, 126].

Для исследования использовалось композиционное шлакощелочное вяжущее состава: гранулированный шлак – 60–65 %; зола-унос – 20–25 %; портландцемент М500 – 10–15 %; содосульфатный активатор ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$) – 3–5 %; жидкое натриевое стекло – 2–5 %.

Изготовили четыре серии образцов из шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков разной длины — 10, 20, 30 и 40 мм.

Влияние размера частиц органического заполнителя из стержней кукурузных початков на характеристики легкого бетона показано в таблице 3.12. [63, 95, 98, 109, 126].

Как видно из таблиц 3.12 и 3.13, плотность легкого бетона уменьшается, а предел прочности при сжатии увеличивается с увеличением размера частиц органического заполнителя из стержней кукурузных початков. Поэтому в дальнейших исследованиях использовали кукурузные початки с размерами до 40 мм.

Таблица 3.12. Зависимость изменения плотности легких бетонов, пределов прочности и его марки от фракции кукурузного заполнителя

№ п/п.	Размеры стержней кукурузных початков, мм	Свойства легкого бетона на основе растительного сырья			
		Плотность, кг/м ³	Предел прочности при осевом сжатии, МПа	Марка по прочности при осевом сжатии	Класс по прочности при осевом сжатии
1	10-15	700	3,11	М 30	В 2,5
2	15-20	680	2,83	М 25	В 2
3	25-30	650	2,85	М 25	В 2,5
4	35-40	620	3,71	М 35	В 3,0

Как было установлено выше, введение смешанных добавок из золы-уноса и портландцемента в состав легкого бетона на щелочных растворах, состоящих из растительного сырья, смесей жидкого стекла и содосульфатной смеси, приводит к появлению новых гидратированных соединений. Их наличие повышает степень гидратации шлаковых вяжущих в легких бетонах на основе стержней кукурузных початков. Эти данные подтверждаются анализами рентгенограмм и термограмм (гл. 3.4) [38, 57, 72, 97, 112, 124].

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что основная прочность легкого бетона на основе стержней кукурузных початков обусловлена наличием шлакощелочных вяжущих на основе щелочных растворов.

Водорастворимые вещества в органических наполнителях обволакиваются частицами шлакощелочного вяжущего по адсорбционному механизму. Создается слой, который препятствует глубокому проникновению воды для смачивания шлакощелочных вяжущих минералов и ухудшает контакт (адгезию) между шлакощелочным вяжущим камнем и органическим наполнителем [23, 48, 56, 63, 98].

Установлено, что наибольшей прочностью обладают составы легкого бетона, применяемые в качестве органического заполнителя на основе

стержней кукурузных початков с фракцией 35–40 мм. Предел прочности при сжатии этих материалов в 7-суточном возрасте составляет 2,27 и 2,51 МПа, а в 28-суточном возрасте достигает 3,41 и 3,64 МПа, соответственно.

Таблица 3.13 Составы смеси легкого бетона в зависимости от фракции стержней кукурузных початков

Наименование составляющих компонентов легкого бетона на основе стержней кукурузных початков	Составы легковесных смесей, % по массе на органических заполнителях, полученных размерами фракции, мм						
	10	15	20	25	30	35	40
Измельченные стержни кукурузных початков, %	33,5	33	32,5	30	31	31,3	31,5
Фосфорный шлак, %	16,5	17	17,5	20	19	18,7	18,5
Содосульфатная смесь, %	10,5	11	11,5	10	9,5	9,5	8,5
Жидкое стекло, %	9,5	9	8,5	10	10,5	10,5	11,5
Портландцемент, %	10,5	11	11,5	10	11,5	11,2	9,7
Зола-унос, %	19,5	19	18,5	20	18,5	18,8	18,5

Плотность таких бетонов составляет 600 и 590 кг/м³, соответственно, теплопроводность — 0,07 Вт/(м·°С). В таблицах 3.13 и 3.14 приведены пробные составы легковесных смесей и их физико-механические свойства в зависимости от фракционного размера стержней кукурузных початков [63, 95, 98, 109, 126].

Далее в исследованиях мы будем использовать в качестве органического заполнителя измельченные стержни кукурузных початков с фракционным диаметром 35 и 40 мм.

Таблица 3.14. Физические и физико-механические свойства легкого бетона на основе стержней кукурузных початков в зависимости от их фракции

№ п/п	Свойства	Свойства легкого бетона при использовании органического заполнителя на основе стержней кукурузных початков размерами фракции, мм						
		10	15	20	25	30	35	40
1	Предел прочности при сжатии, МПа при							
	сроках твердения:							
	- 7 суток	1,72	1,83	1,87	1,91	1,97	2,27	2,51
	- 28 суток	1,57	1,94	2,56	2,87	3,19	3,41	3,64
2	Плотность, кг/м ³	630	630	620	610	610	600	590
3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м ⁰ С)	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07
4	Морозостойкость, Мпрз не менее	25	25	25	25	25	25	25

3.7. Изучение влияния расхода шлакощелочного вяжущего и целлюлозного органического заполнителя на физико-механические свойства лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков

В данной работе исследовалось взаимное влияние количества компонентов шлакового щелочного вяжущего и органического заполнителя в виде измельчённых кукурузных початков (ШЩР/ОЗ) на прочность и структуру лёгкого бетона [63, 95, 98, 109, 126].

Для экспериментальных работ использовались составы шлакощелочных вяжущих компонентов (портландцемент марки 500, фосфорный шлак, зола-унос, содосульфатная смесь и жидкое стекло), измельчённые кукурузные початки с диаметрами 20–40 мм, полученные на измельчительной машине марки Tazz K32 [57, 95, 98, 109, 126].

Формование шлакощелочной легкобетонной смеси осуществлялось на вибропрессовом оборудовании с удельным давлением от 0,1 до 0,35 МПа. Изготавливались образцы-кубы размерами 100×100×100 мм, которые хранились в течение 28 суток в нормальных условиях. Затем на гидравлическом прессе методом разрушающего контроля определялся их предел прочности при сжатии [15, 41, 95, 104, 117].

При изучении влияния расхода щелочного компонента на шлакощелочную легкобетонную смесь на основе стержней кукурузных початков учитывались различные характеристики органического заполнителя и шлакощелочных вяжущих компонентов. При исследованиях приходится иметь дело с «фиктивным» водоцементным отношением (для нашего случая — раствора-заполнительным отношением), так как значительная часть воды поглощалась органическим заполнителем, вследствие чего «истинное» водоцементное отношение неизвестно. Поэтому при приготовлении лёгких бетонных смесей следует поддерживать высокую загрузку раствора, чтобы предотвратить удаление воды из приготовленной смеси и обезвоживание контактной зоны [12, 15, 61, 87, 95].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что оптимальный коэффициент наполнения раствора составляет от 0,9 до 1,5 в зависимости от вида органического наполнителя для получения материала соответствующего качества, прочности и структурной однородности [15, 87, 95, 98, 126].

Результаты экспериментов показывают, что дальнейшее увеличение расхода щелочного раствора приводит к снижению прочности и увеличению плотности и влагосодержания лёгкого бетона, полученного на основе растительного сырья. Кроме того, увеличение расхода щелочного раствора при уплотнении (прессовании) изделия приводит к чрезмерному выделению жидкости, что ухудшает однородность структуры получаемого материала. Повышенная влажность лёгкого бетона на основе растительного сырья приводит к увеличению продолжительности тепловой обработки для

достижения изделиями отпускной прочности (таблица 3.15). [15, 27, 95, 98, 126].

Таблица 3.15 Влияние расхода шлакощелочного вяжущего на свойства лёгких бетонов на основе растительного сырья

№ п/п	Расход шлакощелочного вяжущего, Р/З	Растворошлаковое отношение, Р/Ш	Средняя плотность кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа
1	0,9	0,8	500	1,1
2	1,2	0,9	530	1,5
3	1,5	1,0	580	1,7
4	1,7	1,1	600	2,5
5	1,9	1,2	650	3,5

В ходе опытных работ установлено, что с увеличением содержания органических целлюлозных наполнителей увеличивается количество шлакощелочного раствора (рисунок 3.18).

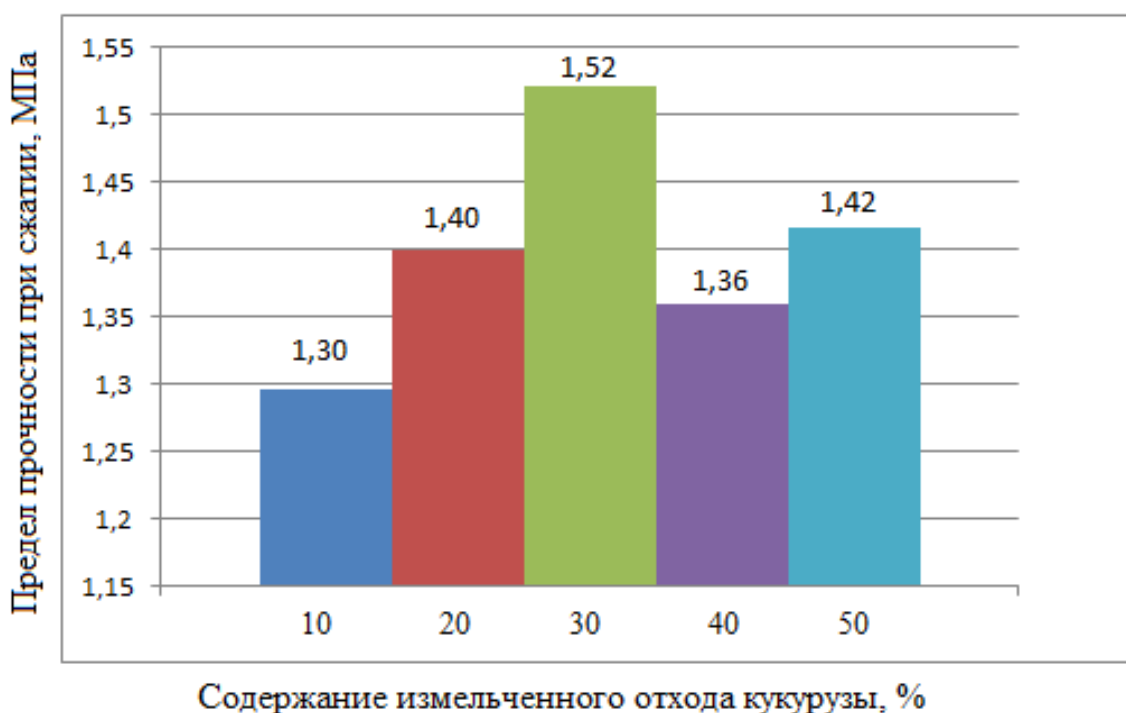


Рисунок 3.18 — Влияние содержания измельчённых стержней кукурузных початков на прочность легкого бетона

С учётом влажности плёнки средняя влажность измельчённых стержней кукурузных початков, испытанных после замачивания, минерализации и введения ускорителей, колебалась в пределах 10–32 % по массе.

Когда содержание заполнителя превышает 50 массовых процентов, негативные факторы, в основном водопоглощающие вещества заполнителя, значительно влияют на прочность цементного камня и древесобетона, что приводит к резкому снижению прочности на сжатие [12, 15, 46, 61, 87].

При фиксированном удельном давлении вибрационного уплотнения (0,7 МПа) и постоянном содержании заполнителя (230 кг/м³) прочностные характеристики легкого бетона на основе стержней кукурузных початков обусловлены величиной расхода шлакощелочного вяжущего, количеством раствора, а также коэффициентом заполнения. Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что увеличение удельного расхода шлакощелочного вяжущего и толщины слоя вяжущего способствует повышению структурной прочности и достижению оптимальной плотности материала [12, 15, 95, 98, 126].

3.8. Исследование адгезии между кукурузным наполнителем и шлакощелочным камнем

Крупнопористая структура легкого бетона на основе растительного сырья с незаполненными межзерновыми промежутками влияет на долговечность и прочность конструкций из легких бетонов, что в значительной степени определяется сцеплением между органическими растительными заполнителями и неорганическими вяжущими [12, 46, 56, 63, 87].

По этой причине производство легкого бетона на основе стержней кукурузных початков осуществляется с использованием растительных органических заполнителей марок от 5 до 35 (ГОСТ 19222–2019) из расчёта от 250 до 420 кг вяжущего на м³ бетона [15, 25, 42, 95, 98].

Концепция легкого бетона на основе растительного сырья как композитной структуры, в которой твёрдый каркас образует тонкая плёнка связующего камня, согласуется с общей теорией и положениями по агрегатно-композитным материалам для искусственных сооружений, разработанными видными учёными [В. И. Соломатов], а промежуточный слой органического наполнителя и связующего камня исследователями, считающими его одним из основных факторов, упрочняющих структуру бетона и повышающих его адгезию [12, 17, 56, 76, 87].

Эти фундаментальные факторы являются ключевыми условиями, при которых рассмотренные свойства двух разрозненных материалов (органического заполнителя и камня вяжущего) определяют долговечность и прочность легких бетонов на основе растительного сырья.

Особое значение для повышения прочности легких бетонов на заполнителе из растительного сырья имеет изучение адгезионной прочности растительных органических заполнителей с вяжущими камнями с учётом склонности растительных органических заполнителей к деформации и расширению во влажной среде. При твердении и сушке легкого бетона на основе растительного сырья эти деформационные свойства оказывают определённое влияние на конструкционную прочность композиции легкого бетона «Растительно-органический заполнитель — вяжущий камень» [12, 46, 56, 63, 87].

В настоящее время не существует общепринятой теории адгезии вяжущих веществ к органическим заполнителям растительного происхождения. Отсутствие стандартизированных методов испытаний означает, что результаты, полученные разными исследователями, весьма противоречивы и трудно сопоставимы.

Исследования, измеряющие степень сцепления органических растительных заполнителей с цементным камнем, привели к рассмотрению вопроса об использовании лёгких бетонов с органическим заполнителем в строительстве. Лёгкий бетон с органическим заполнителем представляет

собой композиционный материал, сочетающий компоненты с различными структурными и механическими свойствами. Влияние различных факторов на сцепление растительных заполнителей с цементным камнем описано в научной литературе. [25, 56, 63, 76, 87].

Проблема адгезии между древесиной и цементом была изучена в следующих работах [25, 46, 61, 63, 87].

Установлено, что сцепление между древесиной и цементным раствором или бетоном зависит от состава смеси, условий хранения конструкции, содержания влаги, шероховатости бревна и опалубки. Значения адгезии варьировались от 0,05 до 1,25 МПа в зависимости от принятых условий (из-за несовершенства используемой методики истинная адгезия значительно ниже).

В работах [46, 56] показано, что водорастворимые сахара в древесине оказывают значительное влияние на адгезию к цементному камню. Аналогичные выводы сделаны и в работах [63, 87, 98]. Значения адгезии для дерева и бетонного блока варьируются от 0,26 до 0,3 МПа. К сожалению, результаты этого исследования сильно отличаются, что затрудняет их сравнение.

При этом учитывались конкретные размеры склеиваемого образца и характер разрушения клея, активность и степень измельчения связующего, толщина клеевого шва. Помимо силы сцепления, на величину сцепления влияла сила защемления (трение при вытягивании деревянного стержня) [47, 63, 12, 14, 17].

При извлечении стержня из затвердевшего раствора регистрируется сила трения материала о затвердевший раствор, при этом учитывается не только сила сцепления, но и защемление, вызванное расширением и деформацией деревянного стержня.

ЦНИИМЭ испытал эту методику [41, 47, 87, 101 104] на образцах, полученных путём формования цементной призмы 40×40×160 мм с деревянной пластиной 40×40×20 мм (образцы хранились в течение 14 дней до

отбора). Однако зафиксировать значение адгезии в приспособлении не удалось.

Чтобы определить способность органических наполнителей к адгезии к шлаковым и щелочным вяжущим, необходимо было разработать методику, учитывающую все характеристики стержней кукурузных початков.

Для этого предлагается метод определения прочности сцепления составов легкого бетона "из растительного материала — шлака — камня, связанного щелочным вяжущим". Таким образом, величина адгезии может быть определена только по способности этих материалов. Клейкий и вялый раствор щелочного вяжущего исключает возможность повышения адгезии клеевых пробок из кукурузных опилок [38, 52, 61, 63, 75, 92, 108].

Была изучена специфическая адгезия кукурузной стружки и шлакового вяжущего камня и предложен метод, учитывающий характеристики кукурузной стружки, плоскость резания (радиальная или тангенциальная), ориентацию фрагментов заполнителя, шероховатость поверхности, толщину слоя шлакового вяжущего камня, разработку модели и условия хранения для получения сопоставимых результатов [47, 56, 63, 95, 101].

Проведены исследования по изучению адгезионной способности различных видов растительных органических заполнителей к растворной части шлакощелочного легкого бетона на основе растительного сырья и её влияния на прочностные свойства, при этом использовали образцы, измельчённые в те же фракции на основе стержней кукурузных початков.

Адгезия служила мерой процессов, происходящих в зоне контакта между шлакощелочной растворной частью легкого бетона и органическим наполнителем [19, 37, 46, 61, 63, 96, 98, 108, 126].

Коэффициент полезного действия (α) органического заполнителя в легком бетоне был выбран для характеристики сцепления между целлюлозным органическим заполнителем и частью шлакощелочного раствора и влияния на прочность шлакощелочного легкого [21, 47, 61, 72, 95, 98]. Известно, что адгезия определяется процессом химического

взаимодействия, происходящего в зоне контакта, и очевидно, что коэффициент эффективности α изменяется при разделении поверхности наполнителя и части бетонного раствора [47, 48, 63, 70, 98].

Для количественной оценки влияния химических процессов, происходящих на границе раздела фаз «вяжущее – заполнитель», на прочность сцепления в исследуемом легком бетоне был применен коэффициент φ . Данный коэффициент отвечает на вопрос, во сколько раз изменяется эффективность органического заполнителя в составе композита при полном устранении (экранировании) химического взаимодействия с помощью контактного способа [22, 25, 27]. Расчет коэффициента φ производится по следующей формуле:

$$\varphi = \frac{\alpha_{\text{неизол}}}{\alpha_{\text{изолир}}}, \quad (3.1)$$

где:

- $\alpha_{\text{неизол}}$ – коэффициент эффективности неизолированных (исходных) органических заполнителей в структуре шлакощелочного легкого бетона;
- $\alpha_{\text{изолир}}$ – коэффициент эффективности тех же заполнителей, предварительно изолированных инертной пленкой для исключения химического взаимодействия с матрицей.

Методика определения коэффициентов эффективности базируется на сравнении физико-механических характеристик композитов. Заполнитель считается эффективным (активно участвующим в формировании прочности), если его коэффициент $\alpha > 1$ [28, 56, 98]. Экспериментальные значения коэффициентов эффективности (α) для органических заполнителей представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 — Экспериментальные значения коэффициентов эффективности (α) для органических заполнителей

Вид органического заполнителя	Состояние поверхности	Коэффициент эффективности (α)	Примечание
Измельченные стержни кукурузных початков (образец 1)	Неизолированная	1,03	Эффективный заполнитель
Измельченные стержни кукурузных початков (образец 2)	Неизолированная	1,01	Эффективный заполнитель
Измельченные стержней кукурузных початков	Изолированная	0,48	Рассчитано по формуле 3.1
Рисовая солома	Неизолированная	0,95*	По данным [44, 123]

Примечание: * — приведено среднее значение по литературным источникам для сравнительного анализа.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что к числу эффективных наполнителей относятся измельченные стержни кукурузных початков [31, 95, 112]. Полученные для них значения коэффициента эффективности α составили 1,03 и 1,01. Для сравнения, образцы легкого бетона, содержащие в качестве наполнителя рисовую солому, продемонстрировали более низкие значения коэффициентов эффективности [44, 123]. Сводные данные по коэффициентам эффективности для различных типов органического сырья представлены в таблице 3.17 [31, 56, 112, 126].

Таблица 3.17 — Сравнительная эффективность органических заполнителей в шлакощелочном легком бетоне

Показатель	Обозначение	Стержни кукурузных початков	Рисовая солома (лит. Данные [31, 56, 112, 126])
Коэффициент эффективности (αнеизол)	α	1,02 – 1,03	0,95
Коэффициент химического взаимодействия	φ	2,1 – 2,6	—
Оценка эффективности	—	Высокая ($\alpha > 1$)	Низкая ($\alpha < 1$)

Результаты расчета коэффициента химического взаимодействия ϕ показали, что для композиций на основе стержней кукурузных початков в данный показатель находится в диапазоне от 2,1 до 2,6 [31, 56, 126]. Это свидетельствует о высокой интенсивности химических реакций на границе раздела фаз между компонентами растительного заполнителя и щелочной средой вяжущего, что вносит определяющий вклад в общую прочность материала [23, 47, 48, 70].

Химические взаимодействия между фракциями кукурузных метёлок и шлакощелочного раствора интенсивно наблюдаются с коэффициентами эффективности ϕ от 2,1 до 2,6 [63, 95, 98, 126].

Другой метод заключается в определении свойств контактного слоя кукурузного наполнителя и камня шлакового вяжущего [12, 63, 70, 84, 98].

Испытание проводили на полированном шлифе образца-куба размером 30×30×30 мм из шлакощелочного вяжущего с размещёнными в центре измельчёнными стержнями кукурузных початков.

Поскольку основное изменение структуры контактного слоя шлакощелочного вяжущего связано с перемещением влаги внутри органического наполнителя, установлена зависимость изменения твердости шлакощелочного вяжущего с различным соотношением компонентов в 3-

дневном, 7-дневном и 28-дневном возрасте. Результаты экспериментальных испытаний представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18. Сравнительное исследование адгезионной эффективности различных целлюлозных органических заполнителей в легких шлакощелочных бетонах

Вид органического заполнителя	Предел прочности органического заполнителя при растяжениях, МПа			Коэффициент эффективности органического Заполнителя в легких бетонах	Величина влияния химического взаимодействия на силу сцепления, ф
	Легкого бетона	Органического заполнителя	Камня шлакощелочного вяжущего		
Измельченные стержни кукурузных початков фракции 35-40мм	3,7	1,34	4,7	1,03	2,6
Измельченные стебли рисовой соломы фракции 25-30мм	1,27	0,88	4,7	0,85	2,1
Измельченные стебли хлопчатника фракции 20-30мм	2,74	1,21	4,7	1,01	2,3

Исследование структуры межфазной зоны показало формирование плотной вяжущей оболочки шириной 35–60 мкм вокруг частиц измельчённых стержней кукурузных початков (рисунок 3.15). Формирование данного слоя обусловлено механизмом щелочной активации, включающим растворение алюмосиликатных фаз гранулированного шлака в высокощелочной среде с последующей поликонденсацией и образованием низкоосновных гидросиликатов кальция и щелочных алюмосиликатных гелей. В межфазной области наблюдается повышенная концентрация продуктов гидратации вследствие градиента влажности и ионной миграции к поверхности пористого заполнителя, что приводит к локальному уплотнению структуры и снижению капиллярной пористости.

Глубина проникновения вяжущего в пористую структуру органического наполнителя, согласно литературным данным, составляет 105–135 мкм и определяется развитой капиллярно-пористой системой целлюлозного материала. При капиллярном всасывании в поры целлюлозоорганического заполнителя активирующего раствора происходит перенос ионов Ca^{2+} , SiO_4^{4-} и AlO_4^{5-} внутрь, где в результате химических реакций происходит образование веществ, формирующих анкеровку и обеспечивающих взаимодействие. Поверхность адгезионного контакта увеличивается вследствие более пространственно развитой переходной области. При этом перераспределяются внутренние напряжения и улучшаются параметры прочности бетона.

Активное взаимодействие щлакощелочного вяжущего с органическим наполнителем обусловлено легким проникновением в высокопористую оболочку частиц стержней кукурузных початков. Под воздействием щелочных компонентов происходит активация шлака, приводящая к образованию гидратов, повышающих микротвердость зоны контакта поверхности органического заполнителя с вяжущим.

Вокруг частиц органического заполнителя формируется слой щелочного теста, прочно связанный с поверхностью. Вследствие этого повышается адгезия заполнителя к цементному камню, улучшается перераспределение нагрузок в трехмерной структуре композита.

Создание условий присутствия пористого целлюлозоорганического заполнителя и щлакощелочного вяжущего необходимо для получения лёгких бетонов с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками [38, 61, 63, 70, 95, 98, 126].

Выводы по главе 3

1. Проведено исследование по подбору вяжущих, нейтрализующих действие растворимых веществ в стержнях кукурузных початков (простых сахаров), увеличивающих предел прочности легкого бетона при сжатии. Анализ данных показывает, что комплексное применение содосульфатной

смеси, золы-уноса и портландцемента обеспечивает более интенсивный набор прочности в ранние сроки твердения, а также более равномерное формирование структуры шлакощелочного камня., по сравнению с чистым портландцементом. Так добавление композиционного вяжущего (содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и портландцемента) в шлакощелочные лёгкие бетоны на основе стержней кукурузных початков повышает их прочность до 2,7–3,0 МПа.

2. Экспериментальные данные рентгенографического и термографического анализа показали образование дополнительных гидратированных соединений при введении композиционного вяжущего (содосульфатной смеси, фосфорного шлака, золы-уноса и портландцемента) в состав шлакощелочного легкого бетона. В контрольном составе (портландцемент) идентифицируются характерные рефлексы кристаллического портландита Ca(OH)_2 с межплоскостным расстоянием $d \approx 4,83 \text{ \AA}$. В модифицированном составе данный рефлекс отсутствует, что свидетельствует о полном связывании свободного Ca(OH)_2 . Вместо этого на рентгенограмме появляется серия новых дифракционных максимумов ($d \approx 3,73\text{--}3,79 \text{ \AA}$, $2,79 \text{ \AA}$, $2,61 \text{ \AA}$), однозначно соответствующих фазе этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), что является ключевым фактором повышения плотности и ранней прочности композита. Исследование микроструктуры легкобетонных образцов, изготовленных на основе стержней кукурузных початков и композиционного вяжущего показало, что в цементной матрице наблюдается плотное распределение стержней кукурузных початков.

3. Выполнен подбор гранулометрического состава, вида и формы стержней кукурузных початков при измельчении для получения легкого бетона на основе стержней кукурузных початков бетонов по их влиянию на предел прочности бетонного композита. Найдено, что максимальная прочность до 4,5 МПа на 28 суток достигнута при использовании стержней кукурузных початков с размером частиц 35–40 мм. Произведен анализ

измельчительного оборудования для эффективного измельчения стержней кукурузных початков.

4. Проведено исследование адгезии между кукурузным наполнителем и шлакощелочным камнем вяжущего. Поскольку основное изменение структуры контактного слоя шлакощелочного вяжущего связано с перемещением влаги внутри органического наполнителя, установлена зависимость изменения твердости шлакощелочного вяжущего с различным соотношением компонентов в 3-дневном, 7-дневном и 28-дневном возрасте. Для количественной оценки влияния химических процессов, происходящих на границе раздела фаз «вяжущее – заполнитель», на прочность сцепления в исследуемом легком бетоне был применен условный коэффициент ϕ . Данный коэффициент отвечает на вопрос, во сколько раз изменяется эффективность органического заполнителя в составе композита при полном устранении (экранировании) химического взаимодействия с помощью контактного способа. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что измельченные стержни кукурузных початков относятся к числу эффективных наполнителей. Коэффициент эффективности составил 1,03. Для сравнения, образцы легкого бетона, содержащие в качестве наполнителя рисовую солому, показывают более низкие значения коэффициентов эффективности – 0,9. Показано, что возможно армирование изделий из данного легкого бетона.

ГЛАВА 4. Определение состава, исследование физических свойств и разработка технологии производства шлакощелочного легкого бетона с заполнителем из стержней кукурузных початков

4.1. Проектирование состава шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков методом планирования эксперимента

Для проектирования состава шлакощелочного легкого бетона с органическим заполнителем из измельчённых кукурузных початков проведён многофакторный эксперимент, учитывающий ключевые параметры, влияющие на прочность и эксплуатационные свойства материала [95]. Основными факторами, выбранными для исследования, являются:

- *Соотношение раствора к заполнителю (P/З) — x_1*
- *Количество фосфорного шлака (в % от массы золы-уноса) — x_2*
- *Количество содосульфатной смеси (в % от массы цемента) — x_3*
- *Содержание органического заполнителя (в % от массы бетона) — x_4*
- *Влажность заполнителя (в % массы) — x_5*
- *Время термообработки (часы) — x_6*

Для исследования влияния этих шести факторов применён центральный композитный план (ЦКП) с повторениями в центре для оценки воспроизводимости и случайной ошибки [95]. Диапазоны изменения факторов приведены в таблице 4.1.

Для унификации анализа и упрощения расчетов использованы безразмерные (кодированные) переменные:

$$X_i = x_i - x_{i0} / \Delta x_i$$

где

x_i — значение фактора в физических единицах,

x_{i0} — значение фактора в центре плана (среднее значение),

Δx_i — шаг изменения фактора (разница между верхним уровнем и центром).

Таблица 4.1. Диапазоны изменения факторов

Фактор	Обозначение	Нижний уровень	Среднее значение	Верхний уровень	Ед. измерения
Растворо-заполнительное отношение (Р/З)	x_1	0,3	0,4	0,5	—
Количество фосфорного шлака (%)	x_2	3	51,5	100	%
Количество содосульфатной смеси (%)	x_3	10	30	50	%
Содержание органического заполнителя (%)	x_4	20	30	40	%
Влажность заполнителя (%)	x_5	5	10	15	%
Время термообработки (часы)	x_6	1	3	5	ч

Общая модель отклика (предел прочности при сжатии, (Y), МПа) с учётом всех факторов и их взаимодействий имеет вид:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.1)$$

где

β_0 — свободный член,

β_i — коэффициенты линейных членов,

β_{ii} — коэффициенты квадратичных членов,

β_{ij} — коэффициенты взаимодействий факторов,

ε — случайная ошибка.

Рассчитанные параметры модели представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Статистическая оценка коэффициентов регрессии

Коэффициент	Оценка (β)	Стандартная ошибка ($\Delta \beta$)	t-статистика	p-значение	Значимость ($\alpha=0,05$)
β_0	2,65	0,05	53,00	<0,001	Да
β_1	0,12	0,03	4,00	0,001	Да
β_2	-0,10	0,04	-2,50	0,015	Да
β_3	-0,48	0,05	-9,60	<0,001	Да
β_4	0,25	0,03	8,33	<0,001	Да
β_5	-0,18	0,04	-4,50	<0,001	Да
β_6	0,09	0,03	3,00	0,004	Да
β_{11}	0,17	0,02	8,50	<0,001	Да
β_{22}	-0,36	0,03	-12,00	<0,001	Да
β_{33}	-0,21	0,04	-5,25	<0,001	Да
β_{44}	0,15	0,03	5,00	<0,001	Да
β_{55}	-0,11	0,03	-3,67	0,001	Да
β_{66}	0,07	0,02	3,50	0,002	Да
β_{12}	0,09	0,02	4,50	<0,001	Да
β_{13}	0,06	0,02	3,00	0,004	Да
β_{14}	-0,05	0,02	-2,50	0,015	Да
β_{15}	0,04	0,02	2,00	0,045	Да
β_{16}	-0,03	0,02	-1,50	0,130	Нет
β_{23}	0,02	0,02	1,00	0,320	Нет
β_{24}	-0,01	0,02	-0,50	0,620	Нет
β_{25}	0,03	0,02	1,50	0,130	Нет
β_{26}	0,00	0,02	0,00	1,000	Нет
β_{34}	-0,02	0,02	-1,00	0,320	Нет
β_{35}	0,01	0,02	0,50	0,620	Нет
β_{36}	0,02	0,02	1,00	0,320	Нет
β_{45}	-0,03	0,02	-1,50	0,130	Нет
β_{46}	0,02	0,02	1,00	0,320	Нет
β_{56}	0,01	0,02	0,50	0,620	Нет

Проведение эксперимента по ЦКП с количеством опытов $N = 64$ включало не менее 5 повторений в центре. Оценка однородности дисперсий проводилась по критерию Кохрена, а адекватности модели — по F-критерию Фишера. Проверка значимости коэффициентов выполнялась по t-критерию Стьюдента [95].

Коэффициент детерминации модели R^2 составил 0,942, таким образом, разработанная модель объясняет 94,2% вариации прочности лёгкого бетона. Величина исправленного коэффициента детерминации R^2_{adj} составляет 0,927, что говорит об отсутствии переобучения модели и её устойчивости.

Рассчитанное значение F-критерия Фишера составляет 62,4, что больше критического значения $F_{кр}$, равного 4,28, что говорит о статистической значимости модели и адекватности описания экспериментальных данных.

При проведении регрессионного анализа данных для состава композита с водотвёрдым отношением $B/T = 0,35$ получены следующие величины показателей: $R^2 = 0,953$; $R^2_{adj} = 0,939$; $F_{расч} = 71,2$. Модель является значимой.

Из результатов регрессионного анализа следует, что минеральные добавки оказывают большее влияние в композитах с низким отношением B/T . Это выражено в экстремальном характере поверхности отклика. Высокая точность оценки параметров модели следует из малых доверительных интервалов [95].

С помощью регрессионных моделей второго порядка надёжно описывается влияние содержания шлакощелочной смеси на прочность лёгкого бетона. Корректность составления математической модели доказана высокими значениями критерия Фишера, значимостью коэффициентов регрессии и величинами коэффициентов детерминации. Таким образом, разработанные математические зависимости пригодны для оптимизации составов лёгких бетонов с целью повышения их прочностных параметров [95].

Уравнение регрессии в конечном виде:

$$Y = 2,65 + 0,12 X_1 - 0,10 X_2 - 0,48 X_3 + 0,25 X_4 - 0,18 X_5 + 0,09 X_6 + 0,17 X_1^2 - 0,36 X_2^2 - 0,21 X_3^2 + 0,15 X_4^2 - 0,11 X_5^2 + 0,07 X_6^2 + 0,09 X_1 X_2 + 0,06 X_1 X_3 - 0,05 X_1 X_4 + 0,04 X_1 X_5 - 0,03 X_1 X_6 + \dots + \varepsilon \quad (4.2)$$

Из графика на рисунке 4.1 видно, что прочность бетона снижается с увеличением обоих компонентов, что согласуется с отрицательными коэффициентами регрессии, рассчитанными для этих факторов. Оптимальные значения достигаются при минимальном содержании содосульфатной смеси (около 10 %) и фосфорного шлака (около 30 %), что позволяет получить максимальные показатели прочности [95]. Оптимальный состав легкого бетона при плотности 600–650 кг/м³ и прочности 3,5–4,5 МПа представлен в таблице 4.3.

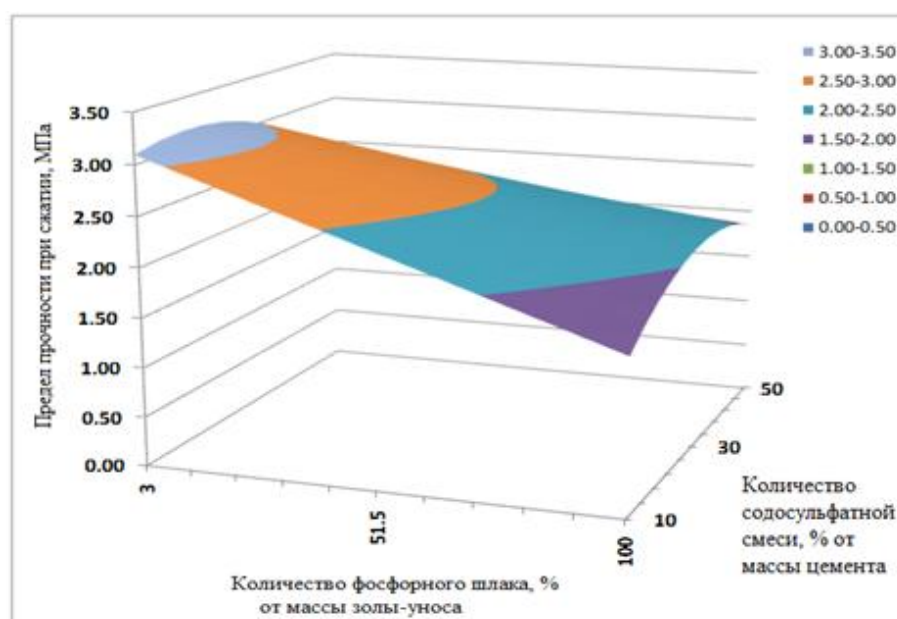


Рисунок 4.1. Влияние содержания шлакощелочной составляющей на предел прочности при сжатии лёгкого бетона при фиксированном отношении раствора к заполнителю ($P/Z = 0,5$)

Таблица 4.3. Оптимальный состав легкого бетона при плотности 600–650 кг/м³ и прочности 3,5–4,5 МПа

Компонент	Содержание (%)
Содосульфатная смесь	10
Портландцемент	20
Фосфорный шлак	20
Зола-унос	20
Измельчённые кукурузные початки	30

На рисунке 4.2 показана поверхность отклика прочности шлакощелочного легкого бетона в зависимости от содержания фосфорного шлака и содосульфатной смеси при уменьшенном соотношении раствора к заполнителю ($P/Z = 0,42$). Наблюдается тенденция роста прочности при снижении содержания содосульфатной смеси, а влияние фосфорного шлака остаётся значительным. По сравнению с рисунком 4.1 при более низком значении (P/Z) достигается более высокая прочность, что свидетельствует о важной роли раствора-заполнительного отношения в формировании структуры бетона [95].

При снижении величины P/Z до 0,35 прочность лёгкого бетона значительно повышается при низких содержаниях шлака и щелочных реагентов (рисунок 4.3). Из этого следует вывод о том, что оптимальный состав лёгкого бетона включает малые количества шлакощелочных компонентов для получения высоких прочностных показателей [95].

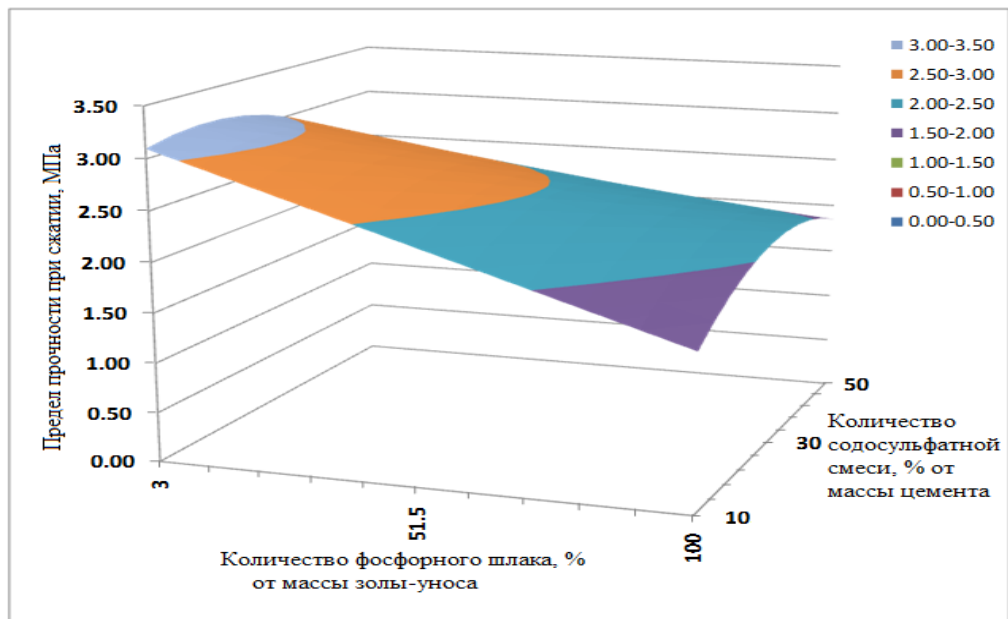


Рисунок 4.2. Влияние содержания шлакощелочной составляющей на предел прочности при сжатии лёгкого бетона при фиксированном отношении раствора к заполнителю ($P/3 = 0,42$)

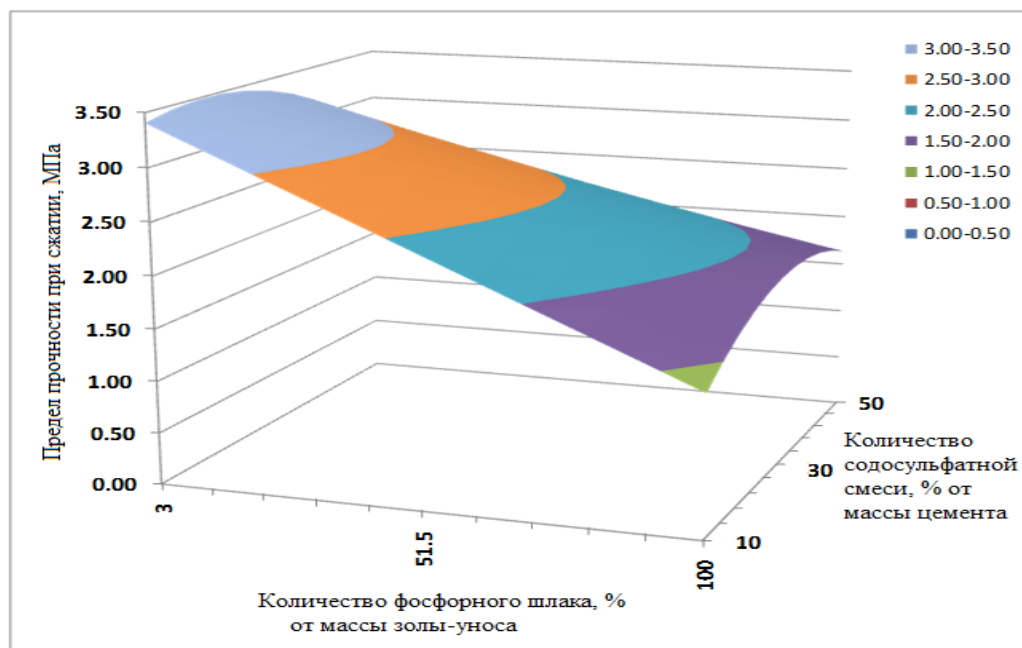


Рисунок 4.3. Влияние содержания шлакощелочной составляющей на предел прочности при сжатии лёгкого бетона при фиксированном отношении раствора к заполнителю ($P/3 = 0,35$)

Включение в эксперимент влажности заполнителя и времени термообработки существенно повысило точность модели и её прикладную ценность. Рекомендуемый оптимальный состав обеспечивает необходимую прочность 3,5–4,5 МПа при плотности 600–650 кг/м³, что делает материал пригодным для теплоизоляционно-конструкционных применений с экономическим эффектом за счёт снижения расхода портландцемента.

Расходы составляющих компонентов шлакощелочных легких бетонов на основе стержней кукурузных початков приведены в таблице 4.4 [62, 95, 98, 109, 126].

Экспериментально установлено, что предварительная обработка органического растительного сырья щелочным раствором для удаления гидролизуемых и водорастворимых веществ повышает качество легких бетонов на основе стержней кукурузных початков.

Таблица 4.4. Расходы составляющих компонентов легких бетонов смеси на основе стержней кукурузных початков на 1 м³ бетона

№ п/п.	Легкий бетон на основе стержней кукурузных початков класса (марки)	Расход компонентов на 1 м ³ легкого бетона на основе стержней кукурузных початков, кг					
		Кукурузный заполнитель, кг	Щелочной раствор, л		Фосфорный шлак, кг	Портландц емент, кг	Зола- унос
			ССС	ЖС			
1	В 2,0 (25)	150	130	150	210	40	165
2	В 2,0 (25)	160	120	160	220	50	170
3	В 2,5(25)	170	130	150	230	60	175
4	В 3,0 (35)	180	140	140	240	70	180

Прим.: СССР-Содосульфатная смесь; ЖС-Жидкое стекло

4.2. Исследования свойств полученного шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков

4.2.1. Влияние вида вяжущего на физико-механические свойства шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков

Плотность лёгкого бетона на основе растительного сырья зависит от насыпной плотности, расхода органического заполнителя и вида вяжущего на 1 м³ конечного продукта. Постепенно увеличивая расход органического заполнителя и удельное давление легковесной смеси при снижении расхода вяжущего, можно повысить плотность лёгкого бетона из растительного сырья без снижения его прочности. Плотность лёгкого бетона из растительного сырья оказывает значительное влияние на прочностные характеристики, а также на другие свойства, например, теплофизические. Прочностные характеристики лёгкого бетона на основе растительного сырья являются главной характеристикой готового строительного материала. Зависимость прочности и плотности лёгких бетонов на основе растительного сырья от вида вяжущего вещества приведена в таблице 4.5. На кубических образцах со средней плотностью от 500 до 650 кг/м³ изучали изменение прочностных свойств лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков. Образцы хранились при естественной влажности и в лабораторных условиях. Соотношение компонентов было подобрано в гл. 4.1 [10, 46, 61, 70, 95, 98, 125].

Как видно из приведённой таблицы, подобранный состав шлакощелочного бетона показывает более высокую прочность по сравнению с обычным портландцементным вяжущим. В результате исследования наблюдалось интенсивное увеличение прочности лёгкого бетона на основе растительного сырья в пределах от 30 до 120 % от исходного значения как для естественно затвердевших, так и для образцов первой термообработки. Через 28 дней твердения скорость набора прочности снижается (рисунок 4.4) [38, 61, 98, 108, 126].

Таблица 4.5. Зависимость плотности и прочностных свойств шлакощелочного бетона на основе растительного сырья от вида вяжущего

Органический заполнитель	Плотность легкого бетона на основе растительного сырья, кг/м ³	Предел прочности при сжатии в 28 сут, МПа	
		Виды легкого бетона на основе растительного сырья на основе вяжущих	
		На основе портландцемента	На основе шлакощелочных вяжущих
Измельченные кукурузные початки	600	2,9	3,1
	620	3,1	3,3
	550	1,9	2,7
	650	3,4	4,5

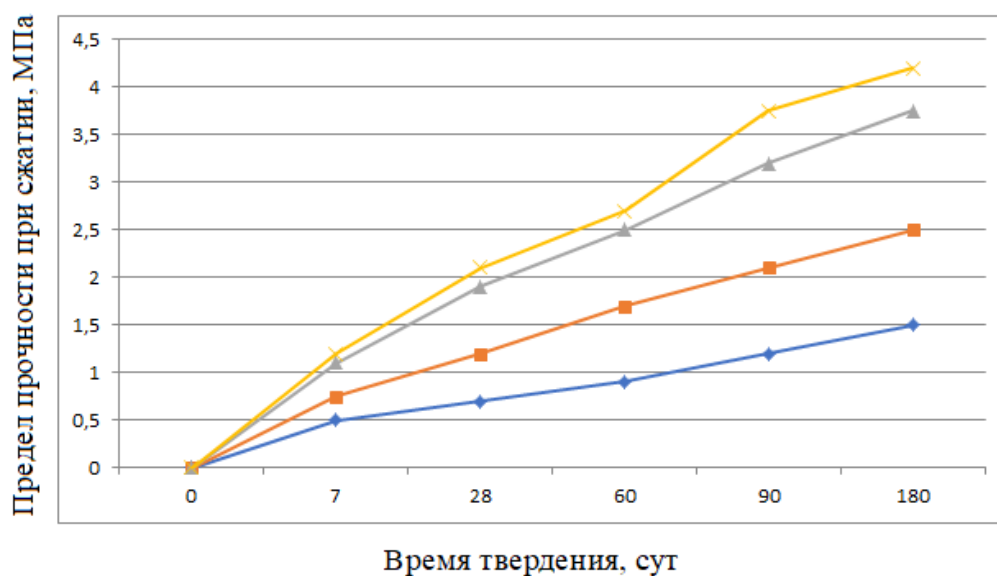


Рисунок 4.4. Влияние тепловой обработки на изменение прочностных свойств шлакощелочного лёгкого бетона с кукурузным наполнителем различной плотности:

- х – лёгкого бетона на основе кукурузного наполнителя плотностью 650 кг/м³;
 ▲ – лёгкого бетона на основе кукурузного наполнителя плотностью 600 кг/м³;
 ■ – лёгкого бетона на основе кукурузного наполнителя плотностью 550 кг/м³;
 ◆ – лёгкого бетона на основе кукурузного наполнителя плотностью 500 кг/м³.

Повышение прочности наблюдается у образцов, изготовленных на стержнях кукурузных початков, и в 90-суточном возрасте составляет от 15 до 40 % (рисунок 4.5). В основном это связано с тем, что кукурузные початки обладают высоким водопоглощением. Можно также предположить, что щелочь, впитавшаяся в состав лёгкого бетона, начинает кристаллизоваться внутри органического заполнителя, тем самым упрочняя органический заполнитель и повышая прочность шлакощелочного лёгкого бетона [63, 70, 98, 126].

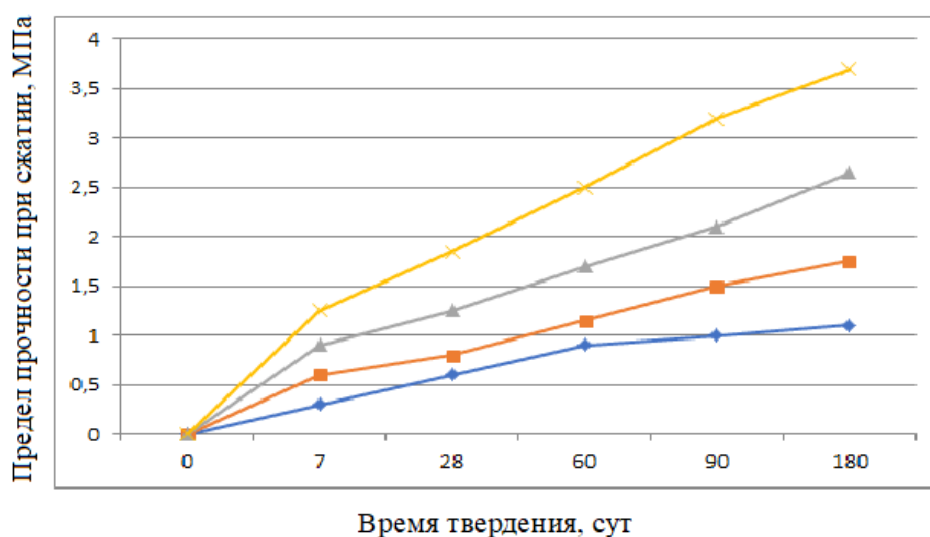


Рисунок 4.5. Влияние естественного твердения в условиях воздушной сушки на изменение прочностных характеристик шлакощелочного лёгкого бетона с стержнями кукурузных початков различной средней плотности:
 x – лёгкого бетона на основе кукурузного наполнителя плотностью 650 кг/м³;
 ▲ – лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков - 600 кг/м³;
 ■ – лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков плотностью 550 кг/м³;
 ◆ – лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков плотностью 500 кг/м³.

Состав и свойства разработанного шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Состав и свойства исследованных шлакощелочных образцов на основе измельченных стержней кукурузных початков

№ Сос- таво- в	Расход материалов на 1м ³					Плот- ность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа
	Органический заполнитель	Компоненты			Щелочной Компонент, л		
	Измельченные стержни кукурузных початков, кг	Расход зола, кг	Шлак, кг	Порт- ланд- цемент, кг	Содосуль- фатная смесь		
1	140	200	250	100	125	650	3,9
2	145	300	200	100	125	630	3,5
3	150	250	250	100	125	650	3,7
4	160	250	250	100	100	600	3,5
5	170	300	-	90	100	580	3,1
6	175	200	150	80	100	560	2,9
7	180	200	250	70	150	550	2,7

4.2.2. Влияние влажности на прочностные характеристики шлакощелочного лёгкого бетона на кукурузном заполнителе

Как известно, прочность при сжатии лёгких бетонов на основе растительного сырья зависит от содержания воды в самом разрабатываемом материале. При снижении влажности прочность образца пропорционально возрастает [12, 14, 28, 38, 61, 74, 98].

Скорость потери влаги у шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков зависит от габаритного размера разрабатываемого изделия. Так, кубы лёгкого бетона 100×100×100 мм влажностью до 25% достигают требуемой прочности через 17 суток после формовки, а разрабатываемое изделие размерами 400×200×200 мм — через 29 суток (рисунок 4.6).

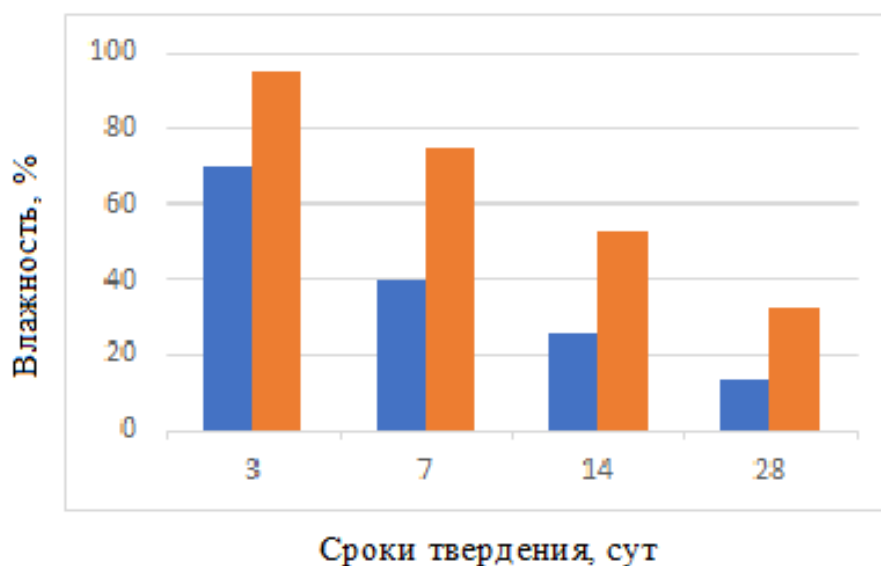


Рисунок 4.6. Зависимость влажности лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков от времени и условий твердения: 1 – кубики с размерами ребра 100×100×100 мм, твердеющих в естественных условиях; 2 – изделия с размерами 400×200×200 мм, прошедшие тепловую обработку

Водопоглощение шлакощелочного лёгкого бетона с кукурузным заполнителем зависит от его плотности (рисунок 4.7). С увеличением плотности шлакощелочного лёгкого бетона его водопоглощение резко снижается и зависит от расхода вяжущего [61, 95, 98, 125, 126].



Рисунок 4.7. Зависимость водопоглощения от плотности шлакощелочного лёгкого бетона с кукурузным наполнителем

Для снижения водопоглощения изделий из шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков защищают открытые поверхности изделия различными плёнками и покрытиями [71, 73, 85, 107, 118].

4.2.3. Исследования теплопроводности, биостойкости, морозостойкости и огнестойкости разработанных шлакощелочных лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков

Теплопроводность. Определение параметров теплопереноса и теплопроводности разработанного шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков проводилось на кафедре физики «НАО» Актюбинского регионального государственного университета имени К. Жубанова (Казахстан) совместно с учреждением «Баишев Университет» (Казахстан) и Ивановским государственным политехническим университетом (Российская Федерация).

Для определения тепловых свойств шлакощелочного лёгкого бетона, изготовленного из стержней кукурузных початков, был выбран теплоимпульсный метод с использованием линейного источника тепла [70, 74, 86, 106, 113, 125].

Таблица 4.7. Теплофизические характеристики шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков в зависимости от плотности.

Плотность, кг/м ³	Влажность, %	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К
550	18,0	0,180	1226
590	23,0	0,183	950
600	21,0	0,173	1162
650	14,2,	0,379	706

Результаты исследования теплопроводности шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков представлены в таблице 4.7, основные характеристики шлакощелочного лёгкого бетона приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 — Основные характеристики шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков

Свойство	Показатель
Плотность, кг/м ³	600–650
Предел прочности при сжатии, МПа	2,1–5,1
Класс прочности, В	1,5– 3,5
Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК)	0,10–0,18
Модуль упругости, МПа	440–900
Морозостойкость, циклы	25–50

Огнестойкость шлакощелочных лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков. Разработанный состав композиционного шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков прошёл испытания на показатели огнестойкости в ТОО «АзимутСтройсервис» при Департаменте по чрезвычайным ситуациям Актыбинской области Республики Казахстан. Результаты испытаний, проведённых по ГОСТ 12.1.044–2018 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения», подтверждают, что разработанный состав шлакощелочного лёгкого бетона относится к группам:

Г1 — слабогорючие;

В1 — трудновоспламеняемые;

Д1 — по дымообразующей способности;

РП1 — нераспространяющие пламя;

Т1 — по классу токсичности продуктов горения.

Огнестойкость составляет 0,75–1,5 ч [109]. Справка о проведении исследования огнестойкости образцов лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков приведена в приложении 1.

Биостойкость шлакощелочных лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков. Исследование биологической устойчивости образцов шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков выполнено в лаборатории ТОО «FIRMITAS» при НАО «Западно-Казахстанский медицинский университет имени Марата Оспанова» Актюбинской области Республики Казахстан в соответствии с ГОСТ 9.048–89 и ГОСТ 19222–2019 «Арболит и изделия из него». Результаты исследований показали, что термические и конструкционные шлакощелочные лёгкие бетоны, разработанные на основе стержней кукурузных початков, относятся к V группе по биостойкости. Это биостойкий материал, который трудно заражается грибами и обеспечивает достаточную долговечность строительных конструкций [42, 98, 112]. Справка о проведении исследования биостойкости образцов лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков приведена в приложении 2.

Морозостойкость шлакощелочных лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков. Результаты испытаний на морозостойкость шлакощелочного лёгкого бетона, изготовленного из стержней кукурузных початков, показали коэффициенты морозостойкости 0,8 и 0,57 для образцов, прошедших 25 и 50 циклов замораживания при температуре от –19 до –25 °С с последующим оттаиванием при температуре +18 °С. Морозостойкость составила 25–50 циклов [98, 112, 126].

Выводы по главе 4

1. В ходе проведённых экспериментов установлены оптимальные составы шлакощелочного легкого бетона на основе органического заполнителя из измельчённых стержней кукурузных початков. Путём последовательного варьирования расхода вяжущего, золы-уноса, шлака и

содосульфатной смеси определено рациональное соотношение компонентов, обеспечивающее получение легкого бетона плотностью 550–650 кг/м³. Установлено, что структура образцов, изготовленных по предложенной композиции, характеризуется равномерным распределением органического наполнителя и достаточно развитой матрицей шлакощелочного камня, что подтверждает эффективность выбранного подхода к формированию технологии данного материала.

2. Определено, что применение шлакощелочного вяжущего позволяет существенно улучшить физико-механические свойства легкого бетона на основе стержней кукурузных початков по сравнению с портландцементным вяжущим. Установлен рост предела прочности при сжатии до 30–120 % относительно исходных значений, обусловленный активной гидратацией и формированием низкоосновных гидросиликатов кальция и щелочных алюмосиликатов. Экспериментальные данные подтверждают, что использование шлакощелочного состава способствует увеличению прочности как при естественном твердении, так и после проведения термической обработки.

3. Снижение количества свободной воды в структуре обуславливает повышение прочностных характеристик лёгкого бетона. Нормативные величины показателей прочности устанавливаются в изделиях малых размеров уже через 17 дней твердения, а в изделиях больших размеров после 28 суток. Композиты с повышенной плотностью имеют низкое водопоглощение. Увеличение содержания шлакощелочных компонентов приводит к формированию более развитой пористой структуры бетона.

4. Лёгкие бетоны, изготовленные с использованием шлакощелочного вяжущего и стержней кукурузных початков, имеют низкую теплопроводность (0,10–0,18 Вт/(м·К)), модуль упругости 440–900 МПа, высокую биостойкость (V группа) и удовлетворительную стойкость к замораживанию-оттаиванию (25–50 циклов). Установлено, что материал устойчив к поражению грибковыми микроорганизмами и может эксплуатироваться в условиях

переменной влажности и отрицательных температур, что делает его перспективным для применения в ограждающих, теплоизоляционных и малоэтажных строительных конструкциях.

5. Подтверждено, что разработанный шлакощелочный легкий бетон на основе стержней кукурузных початков обладает высокими показателями пожарной безопасности. Согласно результатам испытаний по ГОСТ 12.1.044–2018 материал отнесён к группам Г1, В1, Д1, РП1 и Т1, что характеризует его как слабогорючий, трудновоспламеняемый и нераспространяющий пламя материал с низкой дымообразующей способностью и минимальной токсичностью продуктов горения. Предел огнестойкости в пределах 0,75–1,5 ч подтверждает возможность применения материала в качестве конструкционно-теплоизоляционного элемента в зданиях различного назначения.

**Глава 5. Разработка технологической схемы производства
шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных
початков и анализ технико-экономической эффективности**

**5.1. Технология производства шлакощелочного лёгкого бетона на основе
измельчённых кукурузных початков**

Технология изготовления лёгкого бетона из стержней кукурузных початков по своей сути аналогична технологии производства обычного лёгкого бетона на растительном сырье. Процесс приготовления изделий и конструкций из лёгкого бетона на большинстве действующих заводов включает дробление, помол и подготовку органического заполнителя по гранулометрическому составу, его обработку, подачу компонентов лёгкого бетона, приготовление лёгкобетонной смеси, укладку и уплотнение в опалубку, тепловую обработку, выдерживание при положительной температуре и транспортировку продукции на склад [1, 25, 88, 102, 112].

Стержни кукурузных початков доставляются на перерабатывающие предприятия автотранспортом в сыпучем виде. Затем они подаются в дробилку и измельчаются до требуемой фракции. Склад для хранения стержней кукурузных початков может располагаться на открытой площадке с подветренной стороны и оборудованной эффективной дренажной системой. Влажность стержней кукурузных початков должна составлять не более 15% [20, 24, 35, 42, 102, 112].

Среди технических факторов, влияющих на физико-механические свойства лёгкого бетона из стержней кукурузных початков и на экономические показатели его производства, наиболее значимыми являются методы уплотнения и прессования. Именно от них зависят такие свойства материала, как макроструктура, плотность, теплопроводность, звукоизоляция и влагостойкость [7, 27, 74, 88, 117].

Производство органического заполнителя для лёгкого бетона из растительного сырья заключается в измельчении исходного сырья до необходимого размера.

Уплотнение лёгких бетонных смесей при изготовлении изделий требуемых типоразмеров проводят в соответствии с ГОСТ 19222–2019 «Арболит и изделия из него» при стандартном или близком к нормативному расходе сырья [42].

При разработке технологической линии производства шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков учитывались характеристики шлакощелочных вяжущих и измельчённых стержней кукурузных початков [38, 63, 88, 95, 112].

Предлагаемый состав в конструкции технологической линии производства теплоизоляционного и конструкционного шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Предлагаемый состав шлакощелочного лёгкого бетона на основе стержней кукурузных початков

№ п/п	Состав шлакощелочного легкого бетона	Состав, % масс
1	Шлак	22 – 25
2	Содосульфатная смесь и жидкое стекло (в соотношении 3:1)	10 – 12 (7,5–9 + 2,5–3)
3	Портландцемент	19 - 21
4	Измельченные кукурузные початки	22 - 25
5	Зола-унос	21 - 24

Традиционные технологии производства лёгкого бетона на портландцементном вяжущем не позволяют качественно приготовить и уложить смесь, а также получить изделия с показателями плотности и

прочности, соответствующими требованиям ГОСТ 19222–2019 [38, 52, 61, 108, 112].

В связи с этим при совместном участии завода г. Актобе ТОО «А.Е.Н.Д.» была разработана новая методика, основанная на основных положениях теории прочности агрегатно-структурированных материалов, которая позволяет уменьшить фазовое соотношение органических заполнителей (уменьшить толщину слоя матрицы) и улучшить их адгезию.

Приготовление сырьевых смесей из указанных материалов и производство изделий осуществляется по технологии, представленной на рисунке 5.1.

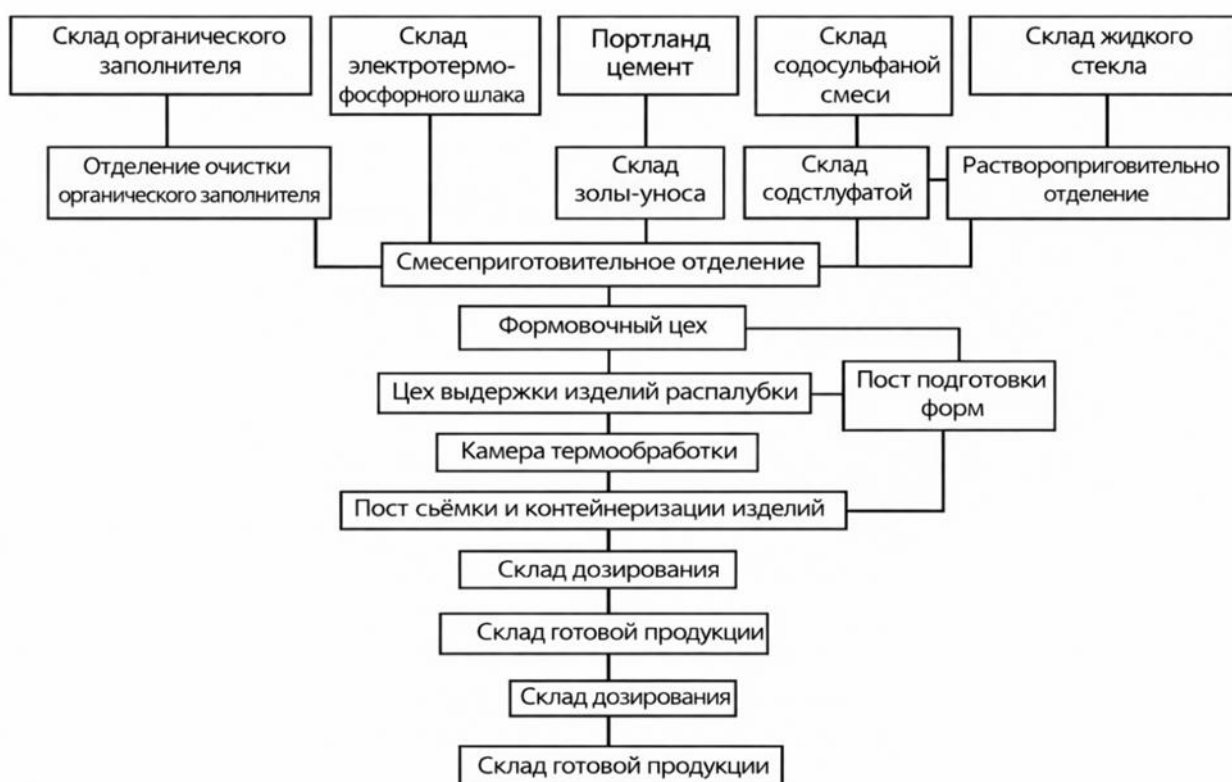


Рисунок 5.1. Основная техническая схема производства шлакощелочного легкого бетона из стержней кукурузных початков

По сравнению с традиционной технологией производства легкого бетона с использованием стержней кукурузных початков данная технология

сокращает время и энергозатраты на приготовление легкой бетонной смеси в 1,7–1,9 раза, время на распределение и уплотнение смеси — в 2–2,5 раза, а продолжительность цикла твердения изделий — в 7–8 раз.

Внедрение основных принципов данной технологии при организации производства изделий и конструкций из легких бетонов на основе растительного сырья различного происхождения позволяет сохранить специфические свойства материала и повысить технико-экономические показатели его производства.

5.2. Описание методики и технологического режима производства легкого бетона на основе стержней кукурузных початков и шлакощелочного вяжущего

Наша методика, используемая в данной работе, касается улучшения свойств легкого бетона на основе стержней кукурузных початков и шлакощелочного вяжущего путём применения основных принципов теории прочности для агрегатно-структурированных материалов.

Методика основывается на оптимизации процесса формирования структуры материала, в том числе на снижении фазового соотношения органических и неорганических компонентов. Основные шаги включают следующие этапы:

1. Предварительная обработка органических заполнителей:

- Стержни кукурузных початков, используемые в качестве органического заполнителя, проходят предварительное измельчение до частиц размером 35–40 мм.
- Органический заполнитель предварительно обрабатывается щелочным раствором для удаления растворимых сахаров и других водорастворимых компонентов, которые могут отрицательно влиять на прочность и

долговечность бетона. Применяется щелочной раствор с массовым соотношением 1:15 или 1:20.

2. Смешивание компонентов:

- Используются шлакощелочные вяжущие (в состав входят зола-унос, шлак и жидкое натриевое стекло).
- Смешивание органического заполнителя с вяжущим происходит в двухосном смесителе, обеспечивающем равномерное распределение компонентов.
- Добавляется силикатный компонент (например, жидкое натриевое стекло) для повышения адгезии между органической и неорганической фазами.

3. Формование:

- Полученная смесь укладывается в формы с неподвижными крышками для создания равномерного давления и минимизации деформаций.
- Используется вибрационное уплотнение, что повышает структурную однородность материала и увеличивает его плотность.

При использовании дроблёных стержней кукурузных початков со значительным содержанием больших долей (составы 6 и 7) в легком бетоне на растительной основе с наличием частиц корки 6–10 % от массы стержней кукурузных початков ухудшается смешиваемость формовочной смеси (установлено визуально), становится затруднительным получение легкого бетонного раствора однородной по объёму массы, увеличиваются модуль сжатия и удельное давление прессования при производстве строительных изделий (рисунок 5.2) [21, 27, 64, 95, 98].

Эти факторы приводят к получению легкого бетона с относительно невысокой прочностью — 1,3 МПа в 28-суточном возрасте, что усложняет технологию его производства. Прочность легкого бетона, изготовленного из растительного сырья, также снижается из-за того, что кукурузная шелуха и

стебли не полностью отделяются при измельчении стержней кукурузных початков, что снижает адгезию шлакощелочного вяжущего к стеблям.

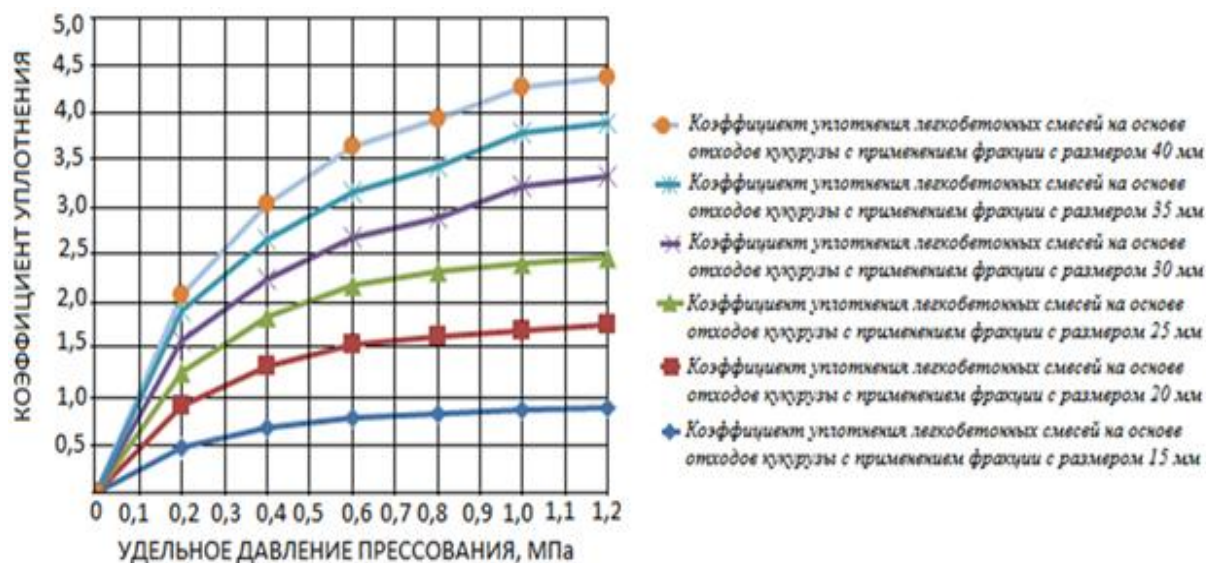


Рисунок 5.2. Влияние удельного давления пресса на модуль сжатия при получении изделий из смесей легкого бетона с разными фракциями кукурузного заполнителя

Установлено, что увеличение удельного давления прессования при формировании изделий более 0,7–1,2 МПа приводит к выделению жидкости вяжущего раствора составов 1, 3, 5 и 7 (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3. Влияние удельного давления прессования на влаговыделение легких бетонных смесей на основе стержней кукурузных початков

Подтверждено также, что влага, накопившаяся в органическом заполнителе при замачивании, не удаляется без дополнительных технических мероприятий. Удаление воды из состава легкого бетона на основе стержней кукурузных початков возможно только физическими методами: прессованием, вакуумированием или сушкой изделия [21, 27, 64, 88, 117].

При наличии большого количества влаги вместе со скоплением массы при уплотнении выдавленная из смеси влага уносит вяжущий раствор и добавки, в результате чего в затвердевшем легком бетоне образуются поры, что приводит к большому расходу шлакощелочных вяжущих и усложняет технологические процессы изготовления строительных материалов и изделий [15, 21, 27, 41, 117].

4. Операция термической обработки:

- Проводится при температуре 80 °С в сушильной камере 6–8 часов для ускорения набора прочности.
- Дальнейшее твердение бетона ведется при 18–24°С.

5. Технологический режим формирования матрицы оптимальной толщины:

1. Сбор, сортировка и обработка органического заполнителя:

Измельчение стержней кукурузных початков до размеров 35–40 мм.

Щелочная обработка сырья раствором NaOH с соотношением 1:15 или 1:20 для удаления водорастворимых веществ.

2. Замешивание бетона:

Используемые компоненты: органический заполнитель, шлакощелочное вяжущее (зола-унос, шлак, жидкое стекло) и содосульфатная смесь взвешиваются в необходимых количествах и смешиваются 7–9 минут в двухосном смесителе.

3. Формование и уплотнение:

- Проводится виброуплотнение после заливки бетонной смеси в формы с неподвижными крышками. Затем при постоянном давлении проводится стабилизация.
- При температуре 80°C в течение 6–8 часов формы термообрабатываются при постоянном контроле влажности во избежание растрескивания изделий.

5. Окончательная выдержка и хранение:

После извлечения из форм изделия выдерживаются при температуре 18–24°C в течение 24–72 часов до достижения требуемой прочности и стабильной влажности.

6. Контроль параметров качества бетона: однородность структуры, влажность, плотность 600–650 кг/м³, прочность на уровне 2,7–4,5 МПа.

5.3. Отличие новой методики производства шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков

Разработанная при совместном участии завода ТОО «А.Е.Н.Д.» (г. Актобе) новая методика существенно отличается от традиционных технологий производства легкого бетона, основанных на портландцементном вяжущем (раздел 5.2.).

Отличие заключается в:

- применении комплексного вяжущего для улучшения химической совместимости и микроструктуры, что приводит к снижению расхода цемента и повышает марку бетона;
- использовании вибрационного уплотнения в формах с неподвижными крышками для создания равномерного давления и снижения пористости;
- оптимизированном режиме термообработки при 80°C в течение 6–8 часов с контролем влажности, который сокращает цикл твердения изделий в 7–8 раз и уменьшает энергозатраты производства.

Главным отличием является комплексное применение принципов теории прочности агрегатно-структурированных материалов, что позволило оптимизировать структуру легкого бетона за счёт уменьшения фазового соотношения органического заполнителя и шлакощелочного вяжущего.

Уменьшение толщины слоя связующей матрицы вокруг частиц стержней кукурузных початков обеспечивает более плотное и прочное соединение между органической и неорганической фазами, улучшая адгезию и когезию материала. Это напрямую повышает прочностные характеристики, долговечность и теплоизоляционные свойства бетона.

В совокупности эти решения позволяют получать шлакощелочной легкий бетон с улучшенными физико-механическими свойствами при существенно сниженных сроках производства и себестоимости, что повышает эффективность и конкурентоспособность продукции и способствует успешному промышленному внедрению технологии.

5.4. Производственное внедрение шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков и его технико-экономическая эффективность

В Актюбинской организации ТОО «А.Е.Н.Д.» были изготовлены опытные образцы легкого бетона для теплоизоляции и строительных работ с использованием стержней кукурузных початков и шлакощелочного вяжущего. К основным компонентам относятся тонкодисперсный шлак от электротермической очистки, зола-унос от электронагревателей г. Актобе, жидкое натриевое стекло, содосульфатная смесь «Электрохимпрома» (г. Актобе) и портландцемент М500. Органическим наполнителем служат стержни кукурузных початков.

Необходимое количество органического заполнителя предварительно смешивали с комплексным щелочным раствором, затем добавляли силикатный компонент и выполняли окончательное смешивание. Все

ингредиенты шлакощелочного раствора перемешивали до получения однородной массы и формовали в подготовленные формы.

Время приготовления шлакощелочной легкобетонной смеси составляло 7–9 минут. Далее изделия с различным временем выдержки направлялись на термообработку в специально оборудованные сушильные камеры. Термическую обработку проводили в сухой среде при температуре до 80°C в течение 6–8 часов по разработанному режиму.

После термообработки изделия извлекали из форм и выдерживали в цехе при температуре 18–24°C, предохраняя от влаги и прямого солнечного излучения.

Дополнительно учитывались однородность структуры материала, внешний вид изделий, шероховатость и целостность поверхности, влажность легкого бетона на основе стержней кукурузных початков при испытаниях, а также срок достижения товарной влажности продукции (по ГОСТ 19222 — 25%).

При опытном выпуске партий блоков для жилищного строительства применяли следующие основные технологические операции:

- смешивание — в двухосном противоточном смесителе, где органический наполнитель перемешивался вибрацией и формовался в форму с неподвижной крышкой;
- термообработка — в сушильной камере при изотермической выдержке при $T = 80^{\circ}\text{C}$ в течение 6–8 часов;
- укладка готовых изделий в штабеля с дальнейшим охлаждением и выдержкой до достижения требуемых прочностных и влажностных характеристик.

Из разработанного легкого бетона была изготовлена партия стеновых блоков размером $400 \times 200 \times 200$ мм (рисунок 5.4).



Рисунок 5.4. Шлакощелочной легковесный блок на основе стержней кукурузных початков

Выпущенная партия продукции использовалась для строительства частных домов в селе Каргалы Актюбинской области вместо керамзитобетона и тяжелого бетона (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5. Малоэтажный дом в селе Каргалы Актюбинской области из шлакощелочных блоков с кукурузным наполнителем

Производство опытных партий шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков показало высокую технико-экономическую эффективность благодаря высокой адгезии заполнителя к шлакощелочному вяжущему и низкой стоимости.

Выпущенная партия продукции использовалась для строительства частных домов в селе Каргалы Актюбинской области вместо керамзитобетона и тяжелого бетона. Исходя из текущей стоимости 1 м³ готовой продукции (на 2022 год), определялась эффективность производства шлакощелочного

легкого бетона на основе стержней кукурузных початков. Экономический эффект (ЭЭ) определяется по формуле:

$$\text{ЭЭ} = (C_{\text{стандарт}} - C_{\text{кукуруза}}) \times V$$

где:

$C_{\text{стандарт}}$ — себестоимость 1 м³ стандартного лёгкого бетона (4 500 руб.);

$C_{\text{кукуруза}}$ — себестоимость 1 м³ лёгкого бетона с использованием стержней кукурузных початков (3 300 руб.);

V — объем производства за год, м³.

Подставляя значения:

$$679\,000 = (4\,500 - 3\,300) \times V \Rightarrow V = 679\,000 / 1\,200 = 565.83 \approx 566 \text{ м}^3$$

Таким образом, при снижении себестоимости 1 м³ лёгкого бетона на 1 200 руб. за счёт использования стержней кукурузных початков необходимо произвести 566 м³ продукции в год, чтобы получить экономический эффект в размере 679 000 руб.

Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы приведён в приложении 3.

Выводы по главе 5

1. Разработана технологическая схема производства шлакощелочного легкого бетона на основе стержней кукурузных початков, включающая подготовку органического заполнителя, дозировку и смешивание компонентов, формование с вибрационным уплотнением, термообработку и окончательную выдержку. Анализ технологических операций показал, что предложенная схема обеспечивает равномерное распределение компонентов, повышает однородность структуры и снижает пористость изделий.
2. Выявлены отличия новой методики от традиционных технологий производства лёгкого бетона, заключающиеся в комплексном применении принципов теории прочности агрегатно-структурированных материалов, использовании композиционного вяжущего, вибрационного уплотнения и оптимизированного режима термообработки. Внедрение этих решений

позволяет сокращать время производства легкой бетонной смеси в 1,7–1,9 раза, время уплотнения смеси — в 2–2,5 раза, а цикл твердения изделий — в 7–8 раз.

3. Проведено опытное производство и подтверждена технико-экономическая эффективность, что свидетельствует о возможности промышленного внедрения технологии. Применение шлакощелочного легкого бетона с стержнями кукурузных початков позволяет снизить себестоимость 1 м³ продукции на 1 200 руб., а производственный объём 566 м³ обеспечивает экономический эффект в размере 679 000 руб. при сохранении высоких эксплуатационных свойств и конкурентоспособности продукции на строительном рынке.

Заключение

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о влиянии щелочной среды вяжущих на их адгезионную прочность к целлюлозной основе волокнистых материалов природного происхождения. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение лёгкого бетона на основе шлакощелочного вяжущего и растительного заполнителя, полученного из производственных стержней кукурузных початков, с повышенной адгезионной прочностью к шлакощелочному камню бетона. Экспериментально установлено, что предварительная обработка органического растительного сырья щелочным раствором для удаления гидролизуемых и водорастворимых веществ повышает прочность лёгких бетонов на основе стержней кукурузных початков.

Найдено, что увеличение размера частиц стержней кукурузных початков снижает плотность и повышает прочность бетона, открывая возможности для создания бетонов с различной плотностью и прочностью. Определены размеры частиц кукурузных початков — 35–40 мм.

Введение в композиционное вяжущее специальных добавок, таких как содосульфатная смесь, фосфорный шлак и зола-унос, способствует нейтрализации водорастворимых органических веществ и повышает прочность до 2,7–5,1 МПа. Выявлены закономерности взаимодействия шлакощелочного вяжущего как с шлаком, так и с целлюлозными компонентами, что обеспечивает оптимальную макроструктуру и высокую прочность бетона. Методом рентгенографического анализа установлено, что такие добавки интенсифицируют процесс гидратации шлакощелочного вяжущего.

Проведено исследование влияния водорастворимых веществ, содержащихся в стержнях кукурузных початков, на свойства и структуру камня шлакощелочного вяжущего. Установлено, что стержни кукурузных початков с меньшим содержанием растворимых сахаров менее влияют на

структурообразование цементного камня легких бетонов по сравнению с древесным заполнителем (фибролитом).

Определена зависимость кинетики твердения легкого бетона от состава и характеристик органических наполнителей. Исследования показали, что прочность легкобетонных композитов может быть повышена на 12–17 % за счёт нейтрализации гидролизуемых веществ в составе органических наполнителей из стержней кукурузных початков. Нейтрализация осуществляется добавлением щелочного раствора с массовым соотношением 1:15 или 1:20. Разработана технологическая схема получения органического заполнителя из кукурузы, обработанного щелочным раствором. Эффективность предлагаемого метода заключается не только в полной нейтрализации растворимых веществ, но и в простоте его применения.

Предложены рецептурные и технологические параметры получения бетонного композита. С помощью методов регрессионного анализа определено оптимальное содержание компонентов в составе легкого бетона на основе стержней кукурузных початков плотностью 600–650 кг/м³: сульфатно-содовая смесь — 10 %, портландцемент — 20 %, шлак/зола-унос — 40 %, измельчённые кукурузные початки — 30 %. Сформулированы теоретические основы получения легких бетонов на основе растительного заполнителя, раскрывающие влияние термических процессов на кинетику их твердения, физические и физико-механические свойства. Изменяя количество органического заполнителя и щелочного компонента, можно существенно снизить себестоимость бетона.

Установлено, что при использовании шлакощелочного вяжущего и дроблёных кукурузных початков возможно получение теплоизоляционно-конструкционного легкого бетона с прочностью при сжатии до 5,1 МПа. Повышение прочности бетонов разработанных составов на 30–120 % достигается при сухой термообработке.

Разработанные шлакощелочные бетоны на основе стержней кукурузных початков имеют марку по морозостойкости $M_{рз} 10-15$, что делает их пригодными для эксплуатации в умеренном климате.

Разработана технологическая схема изготовления шлакощелочного лёгкого бетона на заполнителе из отходов производства кукурузы, дающая экономический эффект по сравнению с композитами на основе других органических заполнителей 679 000 рублей при производстве 566 м³ изделий в год.

Список литературы

1. Абдрахимов, В.З. Технология стеновых материалов и изделий / В.З. Абдрахимов. Самара, 2005. 192 с.
2. Абн-Ганнам Файсал, М. Бетон на активированном цементном вяжущем для автодорожного строительства: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Абн-Ганнам Файсал. Ташкент, 1995. 21 с.
3. Абраменко, Н.И. Поризованный цементный арболит на древесных заполнителях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Н.И. Абраменко. М.: НИИЖБ, 1980. 18 с.
4. Авраменко, Валерий Викторович. Легкие бетоны на основе растительного сырья и минеральных вяжущих для стеновых ограждений : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05 / Авраменко Валерий Викторович; [Место защиты: Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т].- Новосибирск, 2010.- 180 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/784
5. Азимов, А. Особенности твердения шлакощелочных песчаных бетонов и тампонажных растворов при повышенных температурах и давлениях: автореф. дис. ... техн. канд. наук / А.Азимов. Киев, 1983. С. 22–23.
6. Акулова, М.В. Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов // Вестник ВолГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. Волгоград, 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 75–80.
7. Акчабаев, А.А. Основы прогрессивной технологии прессуемого арболита: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / А.А. Акчабаев. СПб.: ЛИСИ, 1992. 297 с.
8. Арболит – проблемы и перспективы: науч.-темат. сб. / об-ние «Росколхозстрой»; проект.-технол. произв. об-ние «Сельхозстройматериалы»; ред.: М.И. Клименко [и др.]. Саратов: Изд-во Саратов.ун-та, 1982. 79 с.

9. Арсенцев, В. А. Экономическая эффективность производства арболита в строительстве. /Арболит и его применение: сборник статей под ред. М. И. Клименко. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1976. - 133 с.:ил.
10. Арутюнян, Маргарита Размиковна. Легкие бетоны на основе пеностеклогранулята с насыпной плотностью 200-350 кг/м³ и их основные физико-механические и теплофизические свойства : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.05 / Научно-исслед. ин-т бетона и железобетона Госстроя.- Москва, 1991.- 18 с.: ил. РГБ ОД, 9 01-2/4065-7
11. Арутюнян, Н.Х. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести / Н.Х. Арутюнян, А.А. Зевин. М.: Стройиздат, 1988. 256 с.
12. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
13. Аяпов, У.А. Вяжущие и бетоны из минеральных отходов промышленности Казахстана / У.А. Аяпов, С.А. Архабаев, З.Б. Шорманова. Алма-Ата: Наука, 1982. 234 с.
14. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, С.В. Демьянова, И.В. Калашников. М.: АСВ, 2006. 368 с.
15. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учеб.пособие для вузов спец. «Производство строительных изделий и конструкций» / Ю.М. Баженов. Изд. 2-е, перераб. М.: Высш. шк., 1987. 55 с.
16. Бакиев Илшат Талгатович. Интенсификация процесса сушки початков кукурузы : Дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 : Уфа, 2005 137 с. РГБ ОД, 61:05-5/2126
17. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика Текст. / В. Г. Батраков. М.: Стройиздат, 1998. - 768 с.
18. Батырбаев, Г.А. Изготовление и испытание панелей на основе стеблей хлопчатника и рисовой лузги / Г.А. Батырбаев, А.Г. Есельбаев, М.К. Нургаев [и др.] // Архитектурно-строительные конструкции и инженерное оборудование зданий и сооружений: сб. Алма-Ата: КазПИ, 1980. С.75–80.

19. Батырбаев, Г.А. К подбору состава арболита / Г.А. Батырбаев // Бетон и железобетон. 1975. № 6. С. 117.
20. Батырбаев, Г.А. Оборудование для измельчения стеблей хлопчатника для производства арболита / Г.А. Батырбаев // Арболит и его применение/ под ред. М.И. Клименко. Саратов: Изд-во Саратов.ун-та, 1976. С. 65–71.
21. Батырбаев, Г.А. Параметры изготовления и эффективность арболита дробленых стеблях хлопчатника / Г.А. Батырбаев // Бетон и железобетон. 1977. № 7. С. 28–29.
22. Беленький, Ю.С. Конструктивные свойства арболита / Ю.С. Беленький // Арболит. Производство и применение. М.: Стройиздат, 1977. С. 178-187.
23. Борковская, Ю.Б. Теория поляризации тонкого двойного слоя в концентрированных дисперсных системах / Ю.Б. Борковская, Н.И.Жарких // Тезисы докладов VIII всесоюзной конференции по коллоидной химии и физико-химической механике. Ташкент, 1983.
24. Борщевский, А.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий: учеб. для вузов / А.А. Борщевский, А.С.Ильин. М.: Высш. шк., 1987. 367 с.
25. Бужевич, Г.А. Арболит. Текст. / Г. А. Бужевич. М.: Стройиздат, 1982.- 244 с.
26. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов: учеб. для вузов по спец. «Химическая технология вяжущих материалов» / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев; под ред. В.В. Тимашева. М.: Высш. шк., 1980. 472 с.
27. Бухаркин, В.И. Основные факторы формирования арболитовой смеси и их влияние на качество изготавливаемых изделий / В.И. Бухаркин, Г.В. Тирновская // Арболит. Производство и применение/ В.А. Арсенцев [и др.]; под ред. А.С. Щербакова, Н.К. Якунина. М.: Стройиздат, 1977. С. 157–165.
28. Вайнштейн, М.З. Формирование прочности легкого бетона и механизм его деформации и разрушения / М.З. Вайнштейн // Бетон и железобетон. 1984. № 6. С.8–10.

29. Верижников Игорь Владимирович. Стратегия и механизмы инновационного развития промышленности строительных материалов в регионах России : Дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 : Орел, 2002 176 с. РГБ ОД, 61:03-8/735-8
30. Виткул, А.Б. Активизация металлургических шлаков для получения вяжущих масс и бетонов высокой прочности и стойкости. Гидратация и твердение вяжущих / А.Б. Виткул, Ю.В. Мелешко, А.Н. Рябцев // Тезисы докладов совещания. Уфа, 1978. С. 321.
31. Влияние влажности на прочностные характеристики блоков из легкого бетона на основе стержней кукурузных початков для строительства текстильных предприятий / Б.Б. Кульшаров // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2024. – № 3 (411). – С. 122-126. – DOI: 10.47367/0021-3497_2024_3_122 - (Scopus, CAS(pt), K1, ИФ - 0,814).
32. Волженский, А.В. О перспективах дальнейшего развития производства экономичных бетонов / А.В. Волженский, Ю.Д. Чистов // Бетон и железобетон. 1991. № 2. С. 10–11.
33. Волженский, А.В. Смешанные портландцементы повторного помола и бетоны на их основе / А.В. Волженский, Л.Н. Попов. М., 1961. 220 с.
34. Волокна с особыми свойствами / Л.А. Вольф [и др.] М.: Химия, 1980. 240 с.
35. Временные рекомендации по механизации уборки и заготовки стеблей хлопчатника для промышленных целей // МСХ УзССР. Ташкент, 1972. С. 19.
36. Временные указания по применению в строительстве изделий из арболита на дробленых стеблях хлопчатника или одубине (РСН 13-71) / Госстрой КазССР. Алма-Ата, 1971. С. 24.
37. Галебуй, Сара. Теплоизоляционный материал на основе отходов хлопчатника Центральной Африки : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.05 / Сара Галебуй; [Место защиты: Иван. гос. архитектур.-строит. ун-т]. - Иваново, 2013. - 18 с.

38. Глуховский, В.Д. Шлакощелочные цементы и бетоны / В.Д. Глуховский, В.А.Пахомов. Киев: Будивельник, 1978. 184 с.
39. Гольдштейн, Л.Я. Использование топливных зол и шлаков при производстве цемента / Л.Я. Гольдштейн, Н.П. Штейерт. Л.: Стройиздат. Ленингр.отд-ние, 1977. 108 с.
40. Гончаров, Ю.И. Шлакобетоны с активным заполнителем / Ю.И. Гончаров, Ш.М. Рахимбаев, М.Ю. Гончарова // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: материалы междунар. науч.-практ. конф. Ростов-н/Д, 2000. С 128–133.
41. ГОСТ 10181-2000. Бетонные смеси. Методы испытаний Текст. Взамен ГОСТ 10181.0-81 - ГОСТ 10181.4-81; введ. 01.07.2001.- М.: Изд-во стандартов, 2001. - 19 с.
42. ГОСТ 19222-2019. Арболит и изделия из него. Общие технические условия. (протокол от 29 марта 2019 г. N 117-П).
43. ГОСТ 25820-2000. Бетоны легкие. Технические условия Текст. -Введ. 07.01.2001.-М.: Изд-во стандартов, 2000.-21 с.
44. Данг, Ши Лан. Высокоэффективный пенобетон с применением золы рисовой шелухи: автореф. дис. ... канд. техн наук: 05.23.05 / Данг Ши Лан. М., 2006. 25 с.
45. Дворкин, Л.И. Высокопрочные бетоны с активированным зольным наполнителем / Л.И. Дворкин // Бетон и железобетон. 1993. № 6. С. 4–6.
46. Джумабаев Мурат Давлетович. Легкий арболитобетон на основе композиционных цементозольношламовых вяжущих и твердых органических отходов (на примере побочных продуктов сельского хозяйства Республики Казахстан): диссертация ... кандидата Технические наук: 05.23.05 / Джумабаев Мурат Давлетович; [Место защиты: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный политехнический университет], 2017
47. Дьяченко, Д.А. Исследование возможности повышения прочности сцепления неорганического связующего с органическим заполнителем / Д.А. Дьяченко // Исследование в области лесной и деревообрабатывающей

промышленности. М., 1971. Вып. 4. С. 102–108.

48. Евстратова, К.И. Физическая и коллоидная химия / К.И. Евстратова, И.А. Купина, Е.Е. Малахова. М.: Высш. шк., 1990. 487 с.

49. Евтушенко, Е.И. Процессы кристаллизации и активность доменных граншлаков / Е.И. Евтушенко, И.В. Старостина, Е.И. Кварцов // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы пятых акад. чтений РААСН. Воронеж, 1999. С. 130–133.

50. Ехаб Мохамед Хосни Рагаб Жаростойкие легкие бетоны на композиционных вяжущих с полыми зольными микросферами : Дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 Москва, 2005 119 с. РГБ ОД, 61:05-5/4256

51. Жолнерович, В.Г. Повышение эффективности использования портландцемента в золонаполненных вяжущих / В.Г. Жолнерович, В.А. Кудинов // Строительные материалы. 1998. № 2. С. 26–27.

52. Исакулов Баизак Разакович. Получение высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих: диссертация ... доктора технических наук: 05.23.05 / Исакулов Баизак Разакович; [Место защиты: Ивановский государственный политехнический университет - ФГБОУ ВПО].- Иваново, 2016

53. Исакулов, Б.Р. Использование промышленных и сельскохозяйственных отходов Казахстана для получения легких бетонов /Б.Р.Исакулов// Науч.-техн. еестн. Поволжья. Казань, 2011. № 4. С. 180–183.

54. Исакулов, Б.Р. Исследование прочностных характеристик поризованных легких бетонов на основе отходов промышленности и растительного сырья Центральной Азии / Б.Р. Исакулов // Научно-технический вестник Поволжья. Казань, 2011. № 5. С. 125–131.

55. Исакулов, Б.Р. Исследование свойств шлакощелочных вяжущих на основе промышленных отходов Казахстана / Б.Р. Исакулов, М.Д. Джумабаев, У.К. Акишев [и др.] // NaukowaprzestrzenEuropy – 2012:[материалы VIII междунар. науч.-практ. конф.].Przemysl, 2012. С. 58–64.

56. Исакулов, Б.Р. Исследование характера и механизма разрушения легких

поризованных арболитобетонов на основе отходов промышленности и растительного сырья / Б.Р. Исакулов, А.С.Жив // Строительные материалы, М., 2012. №12. С. 6–12.

57. Исакулов, Б.Р. Подбор состава и исследование свойств бетона с добавками золы-уноса и пластификатора /Б.Р.Исакулов// Проблемы архитектуры и строительства: науч.-техн. журн. Самарканд, 2009. №4. С. 46–48.

58. Исакулов, Б.Р. Применение промышленных отходов в строительстве / Б.Р. Исакулов // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан. Нукус, 2005. № 2 (201). С. 33–34.

59. Исакулов, Б.Р. Разработка рецептур, технология получения гипсошлаковых вяжущих /Б.Р.Исакулов // Поиск. Научно-технический журнал. Алматы, 2011. №1. С. 127–131.

60. Исакулов, Б.Р. Экспериментальные исследования свойств шлакощелочных вяжущих на основе отходов промышленности Западного Казахстана / Б.Р. Исакулов // Поиск.Научно-технический журнал. Алматы, 2011. № 1. С. 121–127.

61. Исакулов, Байзак Разакович. Исследование прочности и деформативности поризованного арболита на основе отходов хлопчатника: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.05.- Владимир, 2000.- 21 с.: ил.

62. Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны на их основе. Справочное пособие / под ред. Ю.П. Горлова. М.: Стройиздат, 1987. 304 с.

63. Исследование микроструктуры початков кукурузы и их адгезионных свойств в сочетании со шлакощелочными вяжущими в легком бетоне / Б.Б. Кульшаров, Ю.А. Соколова, М.В. Акулова // Инновации и инвестиции. – 2024. –№11. – С. 373-376. (К2, ИФ - 0,668)

64. Ицкович, С.М. Технология заполнителей бетона / С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов. М.: Высш. шк., 1991. 272 с.

65. Калашников, В.И. Кинетика процессов структурообразования шлаковых

- вяжущих / В.И. Калашников, В.Ю. Нестеров // Актуальные проблемы современного строительства: сб. ст. докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 1994. С. 43–50.
66. Камилов, Х.Х. Технология и свойства арболита на основе безобжигового вяжущего и сельскохозяйственных отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Х.Х. Камилов. Ташкент, 1997. 20 с.
67. Касимов, И.К. Особенности получения арболита на основе гуза-пай / И.К. Касимов, А.А. Тулаганов, Ш.Т. Абдукамилов // Бетон и железобетон. 1991. № 5. С. 20–22.
68. Касимов, И.К. Шлакощелочной арболит: пути использования вторичных ресурсов для производства строительных материалов и изделий / И.К. Касимов, А.А. Тулаганов // Тезисы докладов всесоюзного совещания. Чимкент, 1986. С. 467.
69. Клименко, М.И. Исследование арболита на основе высокопрочного гипса. / Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: ВНИИНСМ, 1970. - 18 с.
70. Кобулиев Зайналобудин Валиевич. Физико-химические основы структурообразования и теплофизические свойства материалов на основе минерального и растительного сырья : диссертация ... доктора технических наук : 02.00.04, 01.04.14 / Ин-т химии им. В.И. Никитина АН Респ. Таджикистан.- Душанбе, 2006.- 318 с.: ил. РГБ ОД, 71 07-5/536
71. Комар, А.Г. Строительные материалы и изделия / А.Г. Комар. М., 1983. 483 с.
72. Комплексная электромеханическая активация золошламовых вяжущих для получения легких арболитобетонов / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов, М.Д. Джумабаев[и др.]// Научно-технический вестник Поволжья. Казань, 2014. № 1. С. 45–49.
73. Королев, А.С. Управление водонепроницаемостью цементных композитов путем направленного уплотнения гидратной структуры цементного камня / А.С. Королев. Челябинск, 2008. 147 с.
74. Косач Анатолий Федорович. Комплексное регулирование

эксплуатационных свойств легких бетонов путем направленного структурообразования и активирования компонентов смеси : диссертация ... доктора технических наук : 05.23.05 / Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т.-Новосибирск, 2007.- 277 с.: ил. РГБ ОД, 71 07-5/547

75. Косимое, О.Б. Шлакощелочной конструкционный арболит на основе местных отходов сельского хозяйства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / О.Б. Косимое. Киев, 1990. 17 с.

76. Котенко, В.Д. Прогнозирование свойств композиционных материалов с древесными и другими армирующими наполнителями: дис. ... д-ра техн. наук / В.Д. Котенко. М., 1995. 364 с.

77. Кравченко, Владимир Сергеевич. Параметры и режимы обмолота початков кукурузы : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.20.01 / Всерос. н.-и. и проектно-технол. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва.- зерноград, 1997.- 37 с.: ил. РГБ ОД, 9 98-5/21-2

78. Кривенко, П.В. Специальные шлакощелочные цементы / П.В. Кривенко. Киев:Будивельник, 1992. С. 192.

79. Крылов, Г.А. Механизация переработки сырья в производстве древесностружечных плит / Г.А. Крылов. М.,1984.-- Вып.12.-20с.

80. Кузинец, Б.З. Изучение эффективности применения золы при производстве арболита / Б.З. Кузинец, И.М. Якушина, К.А. Левинский // Науч. тр. Моск. лесотехн. ин-та. 1989. Вып. 216. С. 17–23.

81. Куликов, В.А. Технология клееных материалов и плит / В.А. Куликов, А.Б. Чубаров. М., 1984. 338 с.

82. Легкие бетоны на основе безобжиговых цементов / К.А. Бисенов, И.К. Касимов, А.А. Тулаганов[и др.]. Алма-Ата, 2005. 300 с.

83. Лейкин, Алексей Павлович Формирование оптимальной структуры и свойств легкого бетона как композиционного материала : Дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 СПб., 2005 163 с. РГБ ОД, 61:05-5/2147

84. Лохова, Н.А. Обжиговые материалы на основе микрокремнезема: учеб.пособие / Н.А. Лохова, И.А. Макарова, С.В. Патраманская. Братск:

БрГТУ, 2002. 163 с.

85. Лукутцова Наталья Петровна. Получение экологически безопасных строительных материалов из природного и техногенного сырья : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 : Брянск, 2005 443 с. РГБ ОД, 71:05-5/518

86. Макбузов Амангельды Салтыбалдиевич. Вермикулит каратас-алтынтасского месторождения (Западный Казахстан) и его применение в производстве аэрированных легких бетонов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05 / Макбузов Амангельды Салтыбалдиевич; [Место защиты: С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т].- Санкт-Петербург, 2009.- 156 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/1595

87. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Стройиздат. Ленинград. 1990

88. Никифоров, Александр Юрьевич. Технология и оборудование мобильных производств арболита : диссертация ... кандидата технических наук : 05.21.05.- Красноярск, 1998.- 146 с.: ил. РГБ ОД, 61 99-5/645-8

89. Обрезкова Вера Александровна. Исследование предварительно напряженных изгибаемых конструкций из поризованного арболита : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.01.- Ульяновск, 2005.- 154 с.: ил. РГБ ОД, 61 06-5/11

90. Особенности фазовой и структурной неравновесности металлургических шлаков / Ю.И. Гончаров, А.С. Иванов, М.Ю. Гончарова [и др.] // Изв. вузов. Сер. Строительство. 2002. № 4. С. 50–53.

91. Петунина Ирина Александровна. Разработка ресурсосберегающих процессов очистки и обмолота початков семенной кукурузы : диссертация ... доктора технических наук : 05.20.01 / Петунина Ирина Александровна; [Место защиты: ФГОУВПО "Кубанский государственный аграрный университет"].- Краснодар, 2009.- 304 с.: ил.

92. Подбор составов шлакощелочного арболита / И.К. Касимов, А.А. Тулаганов, О.Б. Косимое [и др.] // Безобжиговые щелочные вяжущие и бетоны: науч. тр. ученых РУЗ. Ташкент, 1994. С. 59–64.

93. Прогнозирование прочности и деформативности арболита / А.А. Гуревич, А.С. Щербаков, Б.П. Маслов [и др.] // Комплексное использование древесины при производстве арболита: науч. тр. М.: МЛТИ, 1982. Вып. 121. С. 72–81.
94. Получение грунтоарболитовых композитов на основе твердых частиц бурового шлама / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов, Ю.А. Соколова, Б.Б. Кульшаров, Б.А. Имангазин // Научное обозрение. – 2016. – № 21. – С. 7–13.
95. Проектирование состава шлакощелочного легкого бетона на основе измельченных стержней кукурузных початков методом планирования эксперимента / Б.Б. Кульшаров, М.В. Акулова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2024. – № 3(31). – С. 7-15. – DOI: 10.25686/2542-114X.2024.3.7 (КЗ, ИФ - 0,308)
96. Радзаунаси Иантара. Легкие бетоны на основе комплексного использования отходов и продуктов переработки кокосовых орехов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05.- Москва, 2002.- 144 с.: ил. РГБ ОД, 61 03-5/1551-9
97. Разработка и исследование свойств вяжущих на основе отходов промышленности/М.В. Акулова, Б.Р.Исакулов, М.Д.Джумабаев[и др.]// Вестник РААСН. Курск; Воронеж, 2013. С. 256–260.
98. Разработка состава и исследование характера формирования прочности арболитовых композитов на основе различных отходов промышленности и растительного сырья / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов, Ю.А. Соколова, Б.Б. Кульшаров, Б.А. Имангазин, Т.Ж. Толеуов // Научное обозрение. – 2017. – № 2. – С. 6–15.
99. Рахимов, М. М. Композиционные шлакощелочные вяжущие с использованием цеолитсодержащего сырья природного и техногенного происхождения, растворы и бетоны на их основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / М.М. Рахимов. Казань, 2007. 174 с.
100. Саяпин, Владимир Викторович. Совершенствование процесса очистки

грубых стебельных кормов от инородных твердых примесей с разработкой и обоснованием параметров сепарирующего устройства : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Саратовский гос. агроинженерный ун-т.- Саратов, 1997.- 24 с.: ил. РГБ ОД, 9 98-1/1959-4

101. Сидорук, Ярослав Дмитриевич. Технология и свойства арболита на дробление с повышенным содержанием экстрактивных веществ (на примере даурской лиственницы) : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.05.- Москва, 1990.- 23 с.: ил.

102. СН 549-82. Инструкция по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита. М.: Госстрой СССР. 1983. С.47.

103. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий Текст.: утв. Госстроем России 19.04.2004: дата введ. 01.01.2005. М.: ФГУП ЦПП, 2004. - 25 с.

104. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции Текст.: утв. Госстроем СССР 04.12.87: дата введ. 01.07.88. М.: ГП ЦПП, 1996. - 192 с.

105. Соколов Валерий Васильевич. Разработка легких поризованных бетонов на вспученном сланце для стеновых ограждающих изделий сельскохозяйственных зданий и совершенствование технологии их изготовления : ил РГБ ОД 61:85-5/229

106. Солдатов Сергей Николаевич. Создание и исследование свойств утеплителей на основе местного сырья : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05.- Пенза, 2001.- 138 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-5/247-3

107. Соломонова Елена Борисовна. Лигнополимерсиликатный арболит : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 : Новосибирск, 2004 144 с. РГБ ОД, 61:04-5/3367

108. Состав, свойства и технология шлакощелочного арболита на основе сельскохозяйственных отходов: шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции / И.К. Касимов, А.А. Тулаганов, Х.Х. Камилов [и др.] // Тезисы докладов 3-й всесоюзной научно-практической конференции: в 2 т. Киев: КИСИ, 1989. Т. 2. С. 152–153.

109. Состав шлакощелочного легкого бетона повышенной огнестойкости на основе измельченных стержней кукурузных початков / Б.Б. Кульшаров, М.В. Акулова // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 2 (51). – С. 108-115. – (КЗ, ИФ - 0,437)
110. Сошкина Галина Николаевна. Легкие бетоны неавтоклавного твердения на основе зол и отходов производства минеральной ваты : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05.- Новосибирск, 2002.- 147 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-5/2395-0
111. Сыдыков, Шурат Курбанович. Обоснование параметров вентиляционно-сушильной установки и режимов ее работы при подсушке и временном хранении початков кукурузы : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01.- Алматы, 1994.- 25 с.: ил.
112. Технология получения высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих / Б.Р. Исакулов, М.В. Акулова, Б.Б. Кульшаров, Т.Ж. Толеуов. – Актобе: АРГУ им. К. Жубанова, 2017. – 253 с.
113. Тихонов Юрий Михайлович. Аэрированные легкие и тепло-огнезащитные бетоны и растворы с применением вспученного вермикулита и перлита и изделия на их основе : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 СПб., 2005 410 с. РГБ ОД, 71:05-5/753
114. Труфляк Евгений Владимирович. Параметры процесса декапитации стеблей кукурузы и отделения початков стрепперным аппаратом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 : Краснодар, 2003. 217 с. РГБ ОД, 61:04-5/616-4
115. Ускорение твердения арболита химическими добавками / В.М. Бутерин, А.С. Щербаков, Н.Н. Силина [и др.] // Научные труды Московского лесотехнического института. 1976. Вып. 93. С. 106–112.
116. Харченко Светлана Сергеевна. Мелкозернистые бетоны на шлакожидкостекольном вяжущем и недефицитных заполнителях : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05.- Иваново, 2003.- 223 с. РГБ ОД, 61 03-5/3954-X

117. Чепелев, Сергей Романович. Моделирование динамики рабочих режимов и разработка импульсного технологического оборудования для формования изделий из арболита: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.21.05 / Лесотехнический ин-т.- Москва, 1992.- 24 с. РГБ ОД, 9 92-5/384-3
118. Чухланов Владимир Юрьевич. Разработка научных основ получения легких полимербетонов и защитных покрытий на основе кремнийорганических связующих: Дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 : Владимир, 2003 311 с. РГБ ОД, 71:05-5/194
119. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях / В.Д. Глуховский, П.В. Кривенко [и др.]. Киев: Высш. шк., 1981. 223 с.
120. Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции: докл. и тез.докл. III всесоюз. науч.-практ. конф.: в 2 т. Киев, 1989. 564 с.
121. Шонтуков Арсен Мазаниевич. Совершенствование технологии сушки, параметры и режимы работы конвективной сушилки при обработке гибридной кукурузы в початках: диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.01.- Нальчик, 2005.- 179 с. РГБ ОД, 61 06-5/898
122. Щелочные и щелочно-щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны / В.Д. Глуховский, А.В. Волянский, В.А. Гончаров [и др.] Киев: Высш. шк., 1979. 231 с.
123. Щибря, Алексей Юльевич. Эффективный теплоизоляционный материал из поризованного арболита на рисовой лузге: диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05.- Краснодар, 2000.- 172 с.: РГБ ОД, 61 01-5/1130-5
124. Электромеханическая активация золошламовых вяжущих для получения легких бетонов /М.В. Акулова, Б.Р.Исакулов, Ж.Б.Тукашев [и др.] // Новейшие достижения науки – 2013: материалы междунар. науч.-практ.конф. София, 2013. С. 72–77.
125. Якубов Самардин Эмомович. Теплопроводность и механические свойства строительных материалов на основе минерального и растительного

сырья: диссертация ... кандидата технических наук: 01.04.14.- Душанбе, 2006.- 164 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/1571

126. Slag-alkali lightweight concrete with corn waste aggregate / B.B. Kul'sharov, B.R. Isakulov, Yu.A. Sokolova, M.V. Akulova, A.G. Sokolova // E3S Web of Conferences. – 2023. – No 457. – ID 01003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202345701003. (Scopus).

Актобе облысының төтенше
жағдайлар департаменті
жанындағы
«АзимутСтройСервис» ЖШС
Телефон: +7 708 941 27 55
E-mail: azimut-ss@bk.ru
030000 Актобе қ.
Маресьева көшесі, 82 2/31



АзимутСтройСервис

ТОО «АзимутСтройСервис»
при департаменте по
чрезвычайным ситуациям
Актюбинской области
Телефон: +7 708 941 27 55
E-mail: azimut-ss@bk.ru
030000 г. Актобе,
ул. Маресьева, 82 2/31

07.04.2022 жыл

07.04.2022 год

Справка

о проведении исследования на огнестойкость образцов легких арболитобетонов на основе кукурузных отходов

Данная справка представляет результаты исследования огнестойкости образцов легких арболитобетонов, изготовленных на основе кукурузных отходов. Исследование было проведено в соответствии с протоколом испытаний, утвержденным ТОО «АзимутСтройСервис».

Методика испытаний включала в себя следующие этапы:

1. Подготовка образцов: образцы легких арболитобетонов на основе кукурузных отходов были изготовлены в соответствии с рекомендациями производителя с использованием стандартных форм.

2. Измерение размеров образцов: до проведения испытаний были измерены размеры каждого образца для дальнейшего анализа.

3. Проведение огнестойкостных испытаний: образцы были подвергнуты воздействию открытого пламени в контролируемых условиях. Температура, время воздействия и другие параметры были записаны для каждого образца.

4. Оценка результатов: после проведения испытаний было осуществлено оценивание степени огнестойкости каждого образца на основе его поведения во время испытаний.

Результаты исследования показали следующее:

- Образцы легких арболитобетонов на основе кукурузных отходов проявили высокую степень огнестойкости.

- Подвергнувшись воздействию открытого пламени в течение определенного времени, образцы не проявляли признаков значительного повреждения или деформации.

- Температурные показатели образцов оставались в пределах безопасных значений для заданных условий эксплуатации.

Выводы, сделанные на основе проведенного исследования, свидетельствуют о том, что легкие арболитобетоны на основе кукурузных отходов обладают высокой огнестойкостью и могут быть эффективно использованы в различных строительных приложениях, где требуется высокий уровень пожарной безопасности. Конструктивное исполнение строительных элементов, выполненных из арболитобетонных камней, не является причиной распространения горения по зданию. Согласно СН РК 2.02-01-2019 конструкции из арболитобетонных камней соответствуют классу конструктивной пожароопасности (не пожароопасные). Предел огнестойкости каменных стен из арболитобетонных камней регламентируется толщиной стены, интенсивностью силовых напряжений в расчетном сечении, коэффициентом продольного изгиба стены, показателем тепловой диффузии арболитобетона, временным сопротивлением сжатию кладки.

Директор:



Янешкий Денис Ярославович

Марат Османов атындағы
Батыс Қазақстан медицина
университеті ЖАҚ жанындағы

FIRMITAS ЖШС

Телефон: +7 708 109 2699
E-mail: berikov-2016@mail.ru
030000 Ақтобе қ.
Маресьева көшесі, 81А
04 наурыз 2022 жыл



TOO FIRMITAS

при НАО Западно-Казахстанский
медицинский университет имени
Марата Османова

Телефон: +7 708 109 2699
E-mail: berikov-2016@mail.ru
030000 г. Ақтобе,
ул. Маресьева, 81А
04 марта 2022 года

СПРАВКА О РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОСТОЙКОСТИ АРБОЛИТОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ КУКУРУЗНЫХ ОТХОДОВ

Настоящая справка предоставляется о результате исследования на биостойкости арболитобетонных образцов, разработанных на основе кукурузных отходов. Данное исследование было выполнено в соответствии с установленными стандартами и методами тестирования.

Цель исследования: Определение устойчивости образцов арболитобетона, изготовленных с использованием кукурузных отходов, к биологическому разрушению.

Методика:

1. Подготовка образцов арболитобетона на основе кукурузных отходов в соответствии с предварительно разработанным рецептом.
2. Образцы были подвергнуты эксплуатационным условиям, симулирующим воздействие биологически активных сред, включая, но не ограничиваясь, влажностью, температурой и присутствием микроорганизмов.
3. **Оценка биостойкости:** После определенного периода экспозиции образцы были извлечены и проанализированы на наличие признаков биологического разложения, таких как изменение внешнего вида, массы, структуры и т. д.

Результаты: Образцы арболитобетона на основе кукурузных отходов продемонстрировали высокую устойчивость к биологическому разложению в условиях, симулирующих естественные эксплуатационные условия. Не было обнаружено значимых изменений во внешнем виде, массе или структуре образцов.

Вывод: На основании проведенного исследования можно сделать вывод о высокой биостойкости образцов арболитобетона, изготовленных с использованием кукурузных отходов. Эти результаты свидетельствуют о потенциальной перспективе использования таких материалов в строительстве и других отраслях, где требуется высокая устойчивость к биологическому воздействию.

Заведующая лабораторией

Директор



Ж.О. Еримбетова

Р.Берікұлы

АКТ
о внедрении результатов научно-исследовательской работы

г. Актобе
23.05.2025 г.

Настоящим актом удостоверяется факт опытно-промышленного внедрения результатов диссертационного исследования, посвящённого разработке технологии изготовления шлакощелочного лёгкого бетона с применением измельчённых отходов кукурузного производства.

Внедрение осуществлено на производственной площадке ТОО «А.Е.Н.Д.» (г. Актобе, Республика Казахстан). В основу внедрённых технологических решений по приготовлению, формованию, уплотнению и термообработке легкобетонных смесей с органическим заполнителем положены принципы теории прочности агрегатно-структурированных материалов и оптимизации фазового состава матрицы.

Научное сопровождение исследований физико-механических, теплофизических и строительно-эксплуатационных свойств разработанного материала осуществлялось в рамках сотрудничества с:

- Кафедрой архитектуры и урбанистики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (Российская Федерация);
- Кафедрой «Транспортная техника, организация перевозок и строительство» НАО «Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова» (Республика Казахстан).

Опытно-промышленная реализация технологии включала следующие ключевые этапы:

1. Подготовку органического заполнителя, включая его щелочную модификацию.
2. Применение шлакощелочного вяжущего на основе гранулированного шлака, золы-уноса, жидкого натриевого стекла и содосульфатной смеси.
3. Формование изделий методом вибрационного уплотнения в формах с неподвижными крышками.
4. Термовлажностную обработку отформованных изделий в камерных условиях при температуре $80 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 6–8 часов.
5. Выпуск опытно-промышленной партии стеновых блоков типоразмера $400 \times 200 \times 200$ мм.

В результате внедрения получены легкобетонные изделия, показатели плотности, прочности при сжатии и влажности которых соответствуют требованиям актуальной нормативной документации. Материал предназначен для использования в теплоизоляционных и конструктивно-

теплоизоляционных ограждающих конструкциях зданий малоэтажной застройки.

Внедрение подтвердило выполнение целевых показателей исследования, а именно:

- Повышение адгезии на границе раздела «органический наполнитель – шлакощелочная матрица» и достижение повышенной однородности макроструктуры бетона.
- Улучшение комплекса физико-механических и теплоизоляционных характеристик готовых изделий.
- Сокращение длительности технологического цикла достижения нормативной прочности в 7–8 раз по сравнению с условиями естественного твердения.
- Снижение себестоимости продукции за счёт замещения портландцемента шлакощелочным вяжущим и применения местных техногенных и растительных отходов.

Экономическая эффективность технологии подтверждена калькуляционными расчётами и апробирована в условиях опытно-промышленного производства. Основным источником экономии – снижение себестоимости 1 м³ материала в сравнении с традиционным арболитом на цементном вяжущем. Изделия опытно-промышленной партии были успешно применены в реальном строительстве объектов малоэтажного жилья на территории Актубинской области.

Таким образом, результаты диссертационной работы внедрены в производственную деятельность ТОО «А.Е.Н.Д.», что подтверждает их практическую значимость и готовность к промышленному тиражированию для организации ресурсоэффективного производства легких бетонов на основе растительных отходов.

Разработчики:

д.т.н., профессор, советник РААСН М.В.Акулова, д.т.н., профессор Б.Р. Исакулов, Старший преподаватель кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и строительство» Б.Б. Кульшаров.

Директор ТОО «А.Е.Н.Д.»



С.Г.Джумагалиева