



ZHANGIR KHAN
UNIVERSITY

**ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКИЙ АГРАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ЖАНГИР ХАНА**

**С. А. Монтаев
Б. Ж. Сахиев
С. М. Жарылгапов**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО
СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВТОРИЧНОГО СТЕКОЛЬНОГО, ТЕХНОГЕННОГО
АЛЮМОСИЛИКАТНОГО И ПРИРОДНОГО
КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ**

Монография

**Уральск
2026**

УДК 666.965.2
ББК 35.41
М 77

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
Рекомендовано к печати Ученым Советом Западно-Казахстанского
аграрно-технического университета имени Жангир хана
(протокол №2 от 24.09.2026 г.)

Авторы:

Монтаев С.А. (Введение; разделы 1.1, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, 1.2, 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, 1.3, 1.3.1, 1.3.2, 1.3.3, 1.4; выводы по главе 1; разделы 2.1, 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.2, 2.3, 2.3.1, 2.3.2; выводы по главе 2; разделы 4.1–4.11; выводы по главе 4; разделы 6.1, 6.2, 6.3, 6.3.1–6.3.6, 6.4, 6.4.1–6.4.5, 6.5, 6.5.1–6.5.7, 6.6; выводы по главе 6; разделы 7.1–7.7; выводы по главе 7; общие выводы); Сахиев Б.Ж. (разделы 3.1–3.12; выводы по главе 3; разделы 8.1, 8.2, 8.2.1–8.2.5, 8.3, 8.3.1–8.3.4); Жарылгапов С.М. (разделы 5.1–5.9; выводы по главе 5; разделы 8.4, 8.4.1–8.4.10, 8.5, 8.5.1–8.5.9, 8.6, 8.6.1–8.6.6, 8.7, 8.7.1–8.7.7; выводы по главе 8).

Рецензенты:

Нугужин Ж.С., доктор технических наук, профессор, академик Национальной инженерной академии Республики Казахстан, директор Казахстанского многопрофильного института реконструкции и развития (КазМИРР), профессор кафедры «Строительные материалы и технологии» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова.

Нуралин Б.Н., доктор технических наук, профессор, Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана

Монтаев С.А., Сахиев Б.Ж., Жарылгапов С.М.

М 77 Научные основы создания энергоэффективного силикатного кирпича с использованием вторичного стекольного, техногенного алюмосиликатного и природного кремнеземсодержащего сырья: Монография / С. А. Монтаев, Б. Ж. Сахиев, С. М. Жарылгапов. – Уральск: ЗКАТУ имени Жангир хана, 2026. – 221 с.

ISBN 978-601-319-725-8

Настоящая монография посвящена разработке научных основ и технологии получения энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя, техногенных алюмосиликатных материалов и природной опоки. Представлены результаты теоретических, экспериментальных и опытно-промышленных исследований влияния стеклопорошка, золы-уноса, керамзитовой пыли и опоки на структуру, фазовый состав, физико-механические и теплофизические свойства силикатного кирпича.

Разработаны рациональные составы сырьевых смесей и усовершенствована технология производства энергоэффективного силикатного кирпича, подтвержденная в промышленных условиях. Отдельное внимание уделено применению опоки Таскалинского месторождения Западно-Казахстанской области.

Монография предназначена для научных работников, преподавателей, докторантов, магистрантов, студентов и специалистов промышленности строительных материалов.

УДК 666.965.2
ББК 35.41

ISBN 978-601-319-725-8

© Монтаев С.А., 2026
© НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	10
	Экологические и научно-технические основы	
Глава 1.	вторичного использования стеклоотходов в	14
	производстве строительных материалов.....	
1.1	Современное состояние образования и переработки стеклоотходов.....	14
1.1.1	Образование стеклобоя как компонента твердых бытовых и промышленных отходов.....	15
1.1.2	Экологические последствия накопления стеклоотходов.....	21
1.1.3	Зарубежный опыт организации переработки стеклобоя.....	24
1.2	Анализ современных направлений использования стеклоотходов в строительных материалах.....	27
1.2.1	Использование стеклобоя в цементных композициях и бетонах.....	28
1.2.2	Применение стеклоотходов в технологии керамических материалов.....	29
1.2.3	Использование стеклопорошка в автоклавных силикатных материалах.....	30
1.3	Научное обоснование применения стеклобоя в технологии силикатного кирпича.....	31
1.3.1	Особенности системы «известь – кремнезем – вода» при автоклавном твердении.....	32
1.3.2	Потенциал стеклопорошка как активной кремнеземсодержащей добавки.....	33
1.3.3	Перспективы получения энергоэффективных стеновых материалов.....	33
1.4	Исследования ученых стран СНГ в области разработки силикатных материалов с использованием техногенного кремнеземсодержащего сырья.....	34
	Выводы по главе 1	36
Глава 2.	Сырьевые материалы и методы исследования при	
	разработке энергоэффективного силикатного	
	кирпича с использованием стеклобоя.....	39
2.1	Характеристика исходных сырьевых материалов.....	39
2.1.1	Кварцевый песок как основной кремнеземсодержащий компонент силикатной массы.....	41

2.1.2	Строительная воздушная известь как источник кальциевого компонента при формировании гидросиликатных фаз.....	44
2.1.3	Физико-химическая характеристика стеклобоя как вторичного кремнеземсодержащего сырья.....	46
2.2	Технологические методы подготовки переработанного стеклобоя.....	49
2.3	Разработка составов сырьевой смеси и технологических параметров производства силикатного кирпича с использованием стеклопорошка.....	57
2.3.1	Формование экспериментальных образцов.....	59
2.3.2	Автоклавная обработка силикатных образцов.....	60
	Выводы по главе 2	61
	Фундаментальные исследования влияния	
Глава 3.	стеклопорошка на структуру и свойства силикатного кирпича	64
3.1	Научная концепция и постановка экспериментальных исследований.....	64
3.2	Сырьевые материалы и организация эксперимента.....	65
3.3	Приготовление смесей, формование и автоклавная обработка.....	67
3.4	Методы определения свойств и исследования структуры.....	68
3.5	Влияние содержания и дисперсности стеклопорошка на среднюю плотность.....	69
3.6	Влияние стеклопорошка на коэффициент теплопроводности.....	70
3.7	Прочностные характеристики модифицированного силикатного кирпича.....	72
3.8	Водопоглощение и морозостойкость.....	73
3.9	Исследование микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии.....	74
3.10	Рентгенофазовый анализ.....	75
3.11	Механизм влияния стеклопорошка на структурообразование.....	76
3.12	Комплексная взаимосвязь «состав — структура — свойства»	78
	Выводы по главе 3	78

Глава 4.	Совместное использование стеклопорошка и золы-уноса для получения энергоэффективного силикатного кирпича	80
4.1	Научная концепция комплексного модифицирования силикатной массы.....	80
4.2	Характеристика золы-уноса как активного алюмосиликатного компонента.....	81
4.3	Микроструктура и элементный состав золы-уноса.....	82
4.4	Фазовый состав золы-уноса.....	84
4.5	Разработка составов силикатной массы со стеклопорошком и золой-уноса.....	85
4.6	Приготовление, формование и автоклавное твердение образцов.....	86
4.7	Влияние комплексного модифицирования на плотность и теплопроводность.....	87
4.8	Прочностные характеристики и выбор рациональных составов.....	89
4.9	Водопоглощение и морозостойкость.....	90
4.10	Механизм совместного действия стеклопорошка и золы-уноса.....	91
4.11	Обоснование рационального состава.....	93
	Выводы по главе 4	93
	Использование стеклопорошка и керамзитовой пыли	
Глава 5.	для получения облегченного энергоэффективного силикатного кирпича	95
5.1	Научное обоснование совместного использования стеклопорошка и керамзитовой пыли.....	95
5.2	Образование и сырьевая характеристика керамзитовой пыли ТОО «СТРОЙКОМБИНАТ».....	95
5.3	Химический состав и физические свойства керамзитовой пыли.....	96
5.4	Макро- и микроструктура керамзитовой пыли.....	97
5.5	Разработка экспериментальных составов.....	99
5.6	Формование и автоклавная обработка.....	99
5.7	Физико-механические и теплофизические свойства.....	100
5.8	Микроструктура модифицированного силикатного кирпича.....	102
5.9	Механизм совместного влияния компонентов.....	104
	Выводы по главе 5	104

Глава 6.	Сравнительный анализ закономерностей формирования структуры и свойств силикатного кирпича при использовании техногенных минеральных компонентов	108
6.1	Постановка задачи сравнительного анализа.....	108
6.2	Сравнительная характеристика исследованных систем.....	112
6.3	Общая роль стеклопорошка в исследованных системах.....	115
6.3.1	Исходные материалы.....	116
6.3.2	Разработка экспериментальных составов.....	117
6.3.3	Приготовление силикатной массы.....	117
6.3.4	Формование экспериментальных образцов.....	118
6.3.5	Автоклавная обработка.....	118
6.3.6	Методика определения свойств.....	119
6.4	Влияние содержания термообработанной опоки на физико-механические и теплофизические свойства силикатного кирпича.....	120
6.4.1	Изменение средней плотности.....	121
6.4.2	Прочность при сжатии.....	122
6.4.3	Коэффициент теплопроводности.....	122
6.4.4	Водопоглощение.....	123
6.4.5	Морозостойкость.....	123
6.4.6	Комплексная оценка результатов.....	123
6.5	Механизм структурообразования силикатного кирпича с использованием термообработанной опоки.....	124
6.5.1	Формирование композиционной структуры сырьевой массы.....	125
6.5.2	Особенности формирования структуры при прессовании.....	126
6.5.3	Формирование гидросиликатной матрицы.....	126
6.5.4	Формирование рациональной поровой структуры.....	127
6.5.5	Механизм повышения энергоэффективности.....	127
6.5.6	Авторская концептуальная модель структурообразования.....	128
6.5.7	Научное значение установленных закономерностей.....	128
6.6	Научное значение применения термообработанной опоки в технологии энергоэффективного силикатного кирпича.....	129

	Выводы по главе 6	132
Глава 7.	Сравнительный анализ эффективности различных способов модифицирования силикатной массы для получения энергоэффективного силикатного кирпича	134
7.1	Научные предпосылки сравнительного анализа различных композиционных систем.....	134
7.2	Сравнительная характеристика исследованных композиционных систем.....	136
7.3	Сравнительный анализ влияния различных модифицирующих компонентов на среднюю плотность силикатного кирпича.....	140
7.4	Сравнительный анализ влияния различных модифицирующих компонентов на коэффициент теплопроводности силикатного кирпича.....	143
7.5	Сравнительный анализ прочностных характеристик модифицированного силикатного кирпича.....	146
7.6	Сравнительный анализ водопоглощения и морозостойкости модифицированного силикатного кирпича.....	149
7.7	Комплексная оценка эффективности исследованных композиционных систем и выбор рациональных составов	152
	Выводы по главе 7.....	156
Глава 8.	Опытно-промышленная апробация технологии производства энергоэффективного силикатного кирпича в условиях действующего предприятия	159
8.1	Цель и задачи опытно-промышленных испытаний.....	159
8.2	Производственная база АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов».....	164
8.2.1	Краткая характеристика предприятия.....	165
8.2.2	Существующая технологическая линия производства силикатного кирпича.....	166
8.2.3	Основное технологическое оборудование.....	167
8.2.4	Производственная мощность опытной апробации.....	169
8.2.5	Причины выбора предприятия в качестве промышленной площадки.....	169
8.3	Подготовка сырьевых материалов и разработка промышленных составов.....	171
8.3.1	Подготовка стеклопорошка.....	171
8.3.2	Подготовка композиции «стеклопорошок + керамзитовая пыль».....	173
8.3.3	Подготовка композиции «стеклопорошок + зола-уноса»...	173
8.3.4	Разработка промышленных составов силикатной массы....	174

8.4	Особенности проведения опытно-промышленных испытаний.....	176
8.4.1	Организация технологического процесса.....	176
8.4.2	Входной контроль сырьевых материалов.....	177
8.4.3	Дозирование компонентов.....	178
8.4.4	Приготовление силикатной массы.....	178
8.4.5	Формование изделий методом полусухого прессования....	179
8.4.6	Формирование пакетов и подготовка к автоклавированию	180
8.4.7	Автоклавная обработка опытных изделий.....	180
8.4.8	Объем выпущенных опытных партий.....	181
8.4.9	Визуальный контроль после автоклавной обработки.....	181
8.4.10	Оценка устойчивости производственного процесса.....	182
8.5	Анализ результатов опытно-промышленной апробации....	182
8.5.1	Оценка прочности при сжатии.....	184
8.5.2	Изменение средней плотности.....	185
8.5.3	Анализ коэффициента теплопроводности.....	185
8.5.4	Водопоглощение опытных изделий.....	186
8.5.5	Морозостойкость.....	187
8.5.6	Влажность после автоклавирования.....	187
8.5.7	Геометрические параметры и внешний вид продукции.....	188
8.5.8	Сопоставление с лабораторными результатами.....	189
8.5.9	Комплексная оценка опытных составов.....	189
8.6	Оценка технологической реализуемости разработанной технологии в условиях действующего производства.....	190
8.6.1	Совместимость разработанных составов с существующей технологической линией.....	191
8.6.2	Оценка работы основных технологических участков.....	192
8.6.3	Необходимость модернизации производственного оборудования.....	192
8.6.4	Влияние новой технологии на производительность предприятия.....	193
8.6.5	Производственная стабильность опытных составов.....	193
8.6.6	Перспективы промышленного внедрения.....	194
8.7	Практическое значение результатов опытно-промышленного внедрения.....	195
8.7.1	Производственно-технологический эффект.....	195
8.7.2	Ресурсосберегающий эффект.....	196
8.7.3	Экологический эффект.....	196
8.7.4	Энергосберегающий эффект.....	197
8.7.5	Экономические предпосылки внедрения.....	197
8.7.6	Социальная и научная значимость разработки.....	198
8.7.7	Перспективы промышленного внедрения.....	198
	Выводы по главе 8.....	199

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	203
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	209
ПРИЛОЖЕНИЯ	218

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития строительной индустрии характеризуется необходимостью решения комплекса взаимосвязанных задач, направленных на повышение энергоэффективности зданий, рациональное использование природных ресурсов, снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду и внедрение принципов циркулярной экономики. Рост объемов строительства, увеличение потребления минерального сырья и энергетических ресурсов обуславливают необходимость разработки новых технологических подходов, позволяющих создавать строительные материалы нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками при одновременном использовании вторичных материальных ресурсов.

Одной из наиболее актуальных проблем современного строительства является снижение энергопотребления зданий и сооружений. Значительная часть энергетических затрат в процессе эксплуатации зданий связана с потерями тепловой энергии через ограждающие конструкции. В связи с этим повышение теплозащитных свойств стеновых материалов является одним из приоритетных направлений развития строительного материаловедения. Современные требования к строительным материалам предусматривают не только обеспечение необходимых прочностных характеристик, но и снижение средней плотности, теплопроводности, повышение долговечности и экологической безопасности продукции.

Особую значимость данная проблема приобретает при модернизации существующих объектов жилищно-коммунального хозяйства, где применение традиционных стеновых материалов с повышенной теплопроводностью приводит к увеличению эксплуатационных расходов, связанных с отоплением зданий. Поэтому разработка энергоэффективных стеновых материалов, позволяющих повысить теплотехнические показатели ограждающих конструкций без существенного изменения существующих промышленных технологий производства, является актуальной научно-технической задачей.

Одним из наиболее распространенных искусственных стеновых материалов является силикатный кирпич автоклавного твердения, который на протяжении длительного времени широко применяется в гражданском и промышленном строительстве благодаря доступности сырьевой базы, высокой геометрической точности изделий, экологической безопасности производства, достаточной прочности и долговечности.

Традиционная технология производства силикатного кирпича основана на использовании известково-кремнеземной сырьевой системы с последующим автоклавным твердением, в процессе которого происходит образование гидросиликатов кальция, определяющих структуру и эксплуатационные свойства готового материала. Вместе с тем

классический силикатный кирпич характеризуется сравнительно высокой средней плотностью и повышенным коэффициентом теплопроводности, что ограничивает его эффективность при использовании в современных энергоэффективных зданиях.

В связи с этим одним из перспективных направлений совершенствования технологии силикатных материалов является управление процессами структурообразования путем введения активных минеральных и техногенных добавок, способных изменять фазовый состав, поровую структуру и теплофизические характеристики материала.

Особый интерес среди вторичных сырьевых ресурсов представляют отходы стекла, образующиеся в результате деятельности предприятий по производству и переработке стекла, объектов строительства, торговли и бытового сектора. Несмотря на возможность практически неограниченной переработки стеклянных отходов, значительная их часть продолжает складироваться на полигонах твердых бытовых отходов, создавая экологическую нагрузку.

Стекло относится к материалам с чрезвычайно длительным периодом естественного разрушения в окружающей среде. Накопление стеклоотходов приводит к увеличению площади полигонов, загрязнению территорий и нерациональному использованию ценных кремнеземсодержащих ресурсов. Поэтому разработка эффективных технологий вовлечения стеклобоя во вторичный производственный цикл является важным направлением реализации принципов устойчивого развития.

С позиции строительного материаловедения стеклобой представляет собой перспективное техногенное кремнеземсодержащее сырье. Основным компонентом стекла является диоксид кремния (SiO_2), находящийся преимущественно в аморфном состоянии. При переводе стеклобоя в тонкодисперсное состояние повышается его реакционная способность, что создает возможность его участия в процессах формирования структуры минеральных композиционных материалов.

В технологии силикатного кирпича использование стеклопорошка представляет особый научный интерес, поскольку аморфный кремнезем стекла способен активно взаимодействовать с гидроксидом кальция в условиях гидротермальной обработки. При автоклавном твердении происходит формирование гидросиликатных соединений кальция различной степени кристалличности, включая C–S–H-фазы и тоберморитоподобные образования, которые определяют прочностные и эксплуатационные свойства материала.

При этом стеклопорошок выполняет комплексную функцию. С одной стороны, он является дополнительным источником реакционно-активного кремнезема, участвующего в формировании цементирующих фаз. С другой стороны, за счет изменения гранулометрического состава

сырьевой смеси и особенностей структурообразования появляется возможность управления плотностью, поровой структурой и теплопроводностью силикатного кирпича.

Однако, несмотря на значительный научный интерес к применению стеклоотходов в бетонах, цементных композициях и керамических материалах, вопросы рационального использования стеклопорошка в технологии плотного автоклавного силикатного кирпича остаются недостаточно изученными. Особенно актуальными являются исследования влияния дисперсности стеклопорошка, его содержания в сырьевой смеси, параметров прессования и режимов автоклавного твердения на формирование структуры и комплекса физико-механических и теплофизических свойств изделий.

Важным аспектом является также необходимость адаптации разработанных решений к условиям действующих промышленных предприятий без существенного изменения существующих технологических линий. Такой подход обеспечивает возможность практического внедрения результатов исследований и повышения экологической эффективности строительной отрасли.

Настоящая монография подготовлена на основе результатов исследований, выполненных в рамках программно-целевого финансирования (2024-2026 г.) Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме: **«Рациональная технология использования стеклобоя в производстве силикатного кирпича для повышения теплозащиты ограждающих конструкций при модернизации объектов ЖКХ».**

Основной целью выполненных исследований являлась разработка научных основ и технологии получения энергоэффективного силикатного кирпича путем использования переработанного стеклобоя в качестве модифицирующего кремнеземсодержащего компонента, обеспечивающего улучшение теплофизических характеристик при сохранении требуемого уровня прочности и долговечности изделий.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

- проведен анализ экологических аспектов образования и переработки стеклоотходов;
- исследованы физико-химические свойства стеклобоя как вторичного сырьевого ресурса;
- разработаны технологические параметры дробления и получения стеклопорошка заданного фракционного состава;
- исследовано влияние содержания и дисперсности стеклопорошка на свойства силикатного кирпича;
- установлены закономерности формирования структуры автоклавных силикатных материалов при введении стеклопорошка;

- определены рациональные составы сырьевых смесей;
- изучены физико-механические, теплофизические и эксплуатационные характеристики разработанного материала;
- разработаны технологические решения для промышленного производства энергоэффективного силикатного кирпича.

Научная новизна выполненных исследований заключается в установлении закономерностей влияния переработанного стеклобоя различной дисперсности на процессы гидротермального структурообразования силикатных материалов, формирование гидросиликатных фаз кальция, изменение микроструктуры, плотности и теплопроводности силикатного кирпича.

Практическая значимость работы заключается в разработке ресурсосберегающей технологии производства модифицированного силикатного кирпича с использованием доступного вторичного сырья, позволяющей одновременно решить экологическую проблему утилизации стеклоотходов и повысить энергоэффективность строительных материалов.

Полученные результаты создают научную и технологическую основу для организации промышленного производства энергоэффективного силикатного кирпича, соответствующего современным требованиям устойчивого строительства, рационального природопользования и модернизации жилищно-коммунальной инфраструктуры Республики Казахстан.

ГЛАВА 1. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВТОРИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕКЛООТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Современное состояние образования и переработки стеклоотходов

В условиях интенсивного развития промышленного производства, роста численности населения и увеличения объемов потребления одной из наиболее актуальных глобальных экологических проблем является образование и накопление твердых бытовых и промышленных отходов. Значительную часть данных отходов составляют материалы минерального происхождения, характеризующиеся высокой устойчивостью к природному разрушению и длительным периодом сохранения в окружающей среде [1–3].

Особое место среди таких отходов занимают стеклосодержащие материалы, объемы образования которых ежегодно увеличиваются вследствие широкого применения стеклянной продукции в строительстве, пищевой промышленности, производстве упаковочных материалов и других отраслях экономики. Несмотря на возможность многократной переработки стекла, значительная часть образующегося стеклобоя продолжает направляться на полигоны твердых бытовых отходов, что приводит к увеличению экологической нагрузки и потере ценных вторичных ресурсов [4,5].

Стекло является искусственным силикатным материалом, обладающим высокой химической устойчивостью за счет формирования пространственной аморфной кремнекислородной структуры. Именно наличие прочной связи Si–O–Si обеспечивает его долговечность, однако одновременно является причиной крайне медленного разрушения стекла в природных условиях [6].

Поэтому традиционный подход, основанный на захоронении стеклоотходов, не соответствует современным принципам устойчивого развития и рационального природопользования. В мировой практике все большее распространение получает концепция циркулярной экономики (Circular Economy), предусматривающая переход от модели «получение сырья – производство – использование – захоронение отходов» к замкнутому циклу повторного использования ресурсов [7–9].

В строительной отрасли реализация принципов циркулярной экономики имеет особое значение, поскольку производство строительных материалов связано с потреблением больших объемов природного минерального сырья и энергетических ресурсов. Использование техногенных отходов в качестве вторичных компонентов строительных

материалов позволяет одновременно решить экологические, ресурсные и технологические задачи [10,11].

Одним из перспективных видов вторичного минерального сырья является стеклобой, который по своему химическому составу представляет собой кремнеземсодержащий материал с высоким содержанием аморфного SiO_2 . Основными компонентами распространенных натрий-кальций-силикатных стекол являются SiO_2 , Na_2O , CaO , MgO и Al_2O_3 , что делает данный материал близким по химической природе к сырьевым компонентам многих строительных материалов [12,13].

В отличие от природного кварцевого песка, где диоксид кремния находится преимущественно в кристаллическом состоянии, стекло содержит аморфный кремнезем, обладающий повышенной потенциальной реакционной способностью. После механической активации путем тонкого измельчения увеличивается удельная поверхность частиц стеклопорошка и создаются условия для его химического взаимодействия с компонентами минеральных систем [14,15].

В последние годы большое количество исследований посвящено использованию переработанного стекла в составе бетонов, цементных материалов, геополимерных систем и керамических изделий. Установлено, что эффективность применения стеклопорошка зависит от его химического состава, размера частиц, степени измельчения и условий твердения материала [16–18].

При использовании крупнодисперсного стеклобоя он преимущественно выполняет функцию инертного заполнителя. Однако при снижении размера частиц до тонкодисперсного состояния стеклопорошок приобретает пуццолановую активность за счет взаимодействия аморфного кремнезема с гидроксидом кальция с образованием дополнительных гидросиликатных соединений кальция [19,20].

Данное обстоятельство представляет особый интерес для технологии силикатных материалов автоклавного твердения, поскольку основным механизмом формирования их структуры является взаимодействие кремнеземсодержащего компонента с известью в гидротермальных условиях [21].

1.1.1 Образование стеклобоя как компонента твердых бытовых и промышленных отходов

Стеклобой образуется на различных стадиях жизненного цикла стеклянной продукции: при производстве, транспортировке, эксплуатации и последующей утилизации изделий. Основными источниками образования стеклоотходов являются предприятия стекольной

промышленности, строительный сектор, коммунальная сфера и бытовое потребление населения [22].

По происхождению стеклоотходы могут быть разделены на несколько основных групп производственный стекломой, образующийся непосредственно на предприятиях изготовления стекла, технологические отходы предприятий по изготовлению оконных конструкций и стеклопакетов, отходы демонтажа зданий и сооружений, бытовое тарное стекло, специальные виды технического стекла [23].



Рисунок 1.1 - Хранение стекломой и отходов стекла на полигоне твердых бытовых отходов г. Уральска.



Рисунок 1.2 - Фрагменты хранения стеклянной тары на территории Департамента экономических расследований города Уральска.

Ниже представляем результаты мониторинговых работ по изучению объемов стеклоотходов образующихся на ведущих ресторанах, кафе предприятиях города Уральска (табл.1.1)

Таблица 1.1 - Результаты по мониторингу стеклянных отходов по городу Уральск

№	Наименование организации (наиболее посещаемые рестораны и кафе)	Кол-во отходов в килограммах (неделя)	Кол-во отходов в килограммах (месяц)
1	Barrel	210	840
2	Галактика	105	420
3	Пинта	350	1400
4	Tango	122,5	490
5	TipaGraf	87,5	350
6	Balziya	70	280
7	Money	210	840
8	Хуторок	175	700
9	Ырыс	52,5	210
10	Cash	24,5	98
11	Иса	500	2000
12	Арбат	21	84
13	Құрмет	24,5	98
14	ТОО «Агран» предприятие по обработке стекла и производство стеклопакетов для окон, дверей и фасадов	2000	8000
15	ТОО «Стеклосервис» предприятие по обработке стекла и производство стеклопакетов для окон, дверей и фасадов	5000	20 000
16	Уральский полигон твердых бытовых отходов (ТБО)	9000	36 000
	Итого:	3952,5	71 5810

После проведения мониторинговых работ по определению объемов стеклоотходов нами проведены работы по доставке стеклоотходов (тарного и оконного) на базе «Научно - исследовательского института строительных материалов и технологии» при ЗКАТУ им. Жангир хана организована прием и хранение стеклоотходов для проведения дальнейших исследований согласно календарного плана проекта.

Ниже представляем фотоматериалы по доставке и хранению стеклоотходов на базе «Научно - исследовательского института строительных материалов и технологии»



Рисунок 1.3 - Фрагменты хранения стеклоотходов (тарного и оконного) на базе «Научно - исследовательского института строительных материалов и технологии» при ЗКАТУ им. Жангир хана

Ниже представляем результаты исследования по определению образующихся стеклоотходов за последние четыре лет (рис. 1.4)

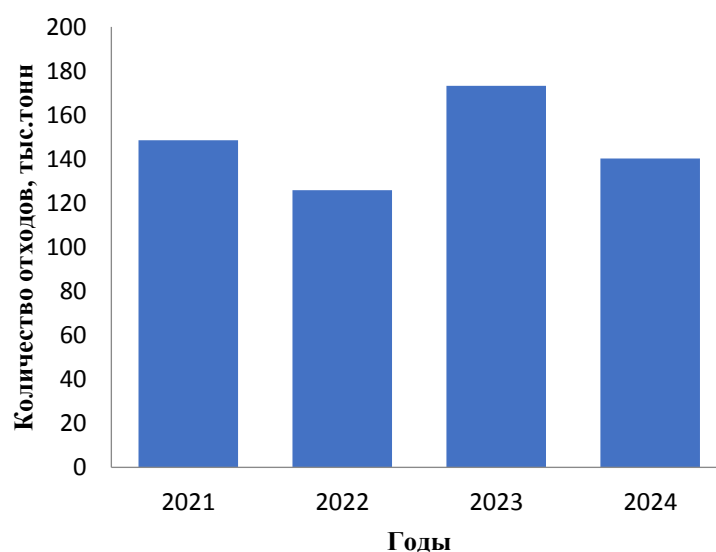


Рисунок 1.4 – Данные по количеству отходов в ЗКО за 2021-2024 годы

Анализируя данные таблицы, выявлено, что более 160 млн. тонн отходов образуется в ЗКО, в том числе 8% – стеклоотходы: 12,8 млн. тонн.

Ежегодно в Республике Казахстан образуются миллионы тонн отходов, в том числе доля стеклоотходов – 7-9 %. Из них перерабатывают и утилизируют около 330 тысяч тонн, что составляет 10-11% от общего количества отходов. Объемы ТБО в Республике Казахстан показан на рисунке 1.5

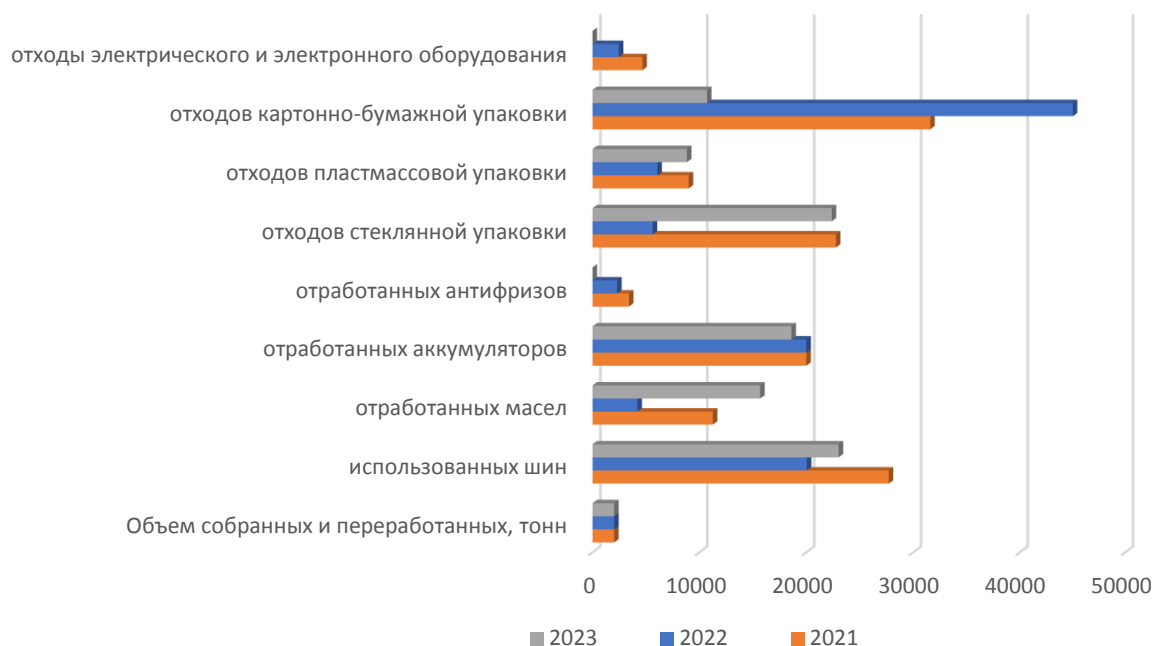


Рисунок 1.5 – Объемы ТБО в Республике Казахстан, тысяч тонн

Огромная проблема стекла заключается в его одноразовом использовании для таких применений, как бутылки для напитков, что является одним из основных видов применения стекла.

В Республике Казахстан по всем областям разрабатывают различные мероприятия с целью минимизировать количество бытовых и промышленных отходов. Программа управления отходами включает в себя ряд мероприятий, направленных на повышение эффективности процедур оценки изменений, происходящих в объеме и составе отходов, с целью выработки стратегии минимизации отходов, которая может быть реализована с помощью экономических или иных способов, которые направлены на улучшение структуры производства и потребления.

Однако переработкой стеклоотходами в Казахстане, в том числе в Западно-Казахстанской области никто не занимается. Объемы сбора и переработки стеклобоя в европейских странах [4] и в Казахстане показаны на рисунке 1.6

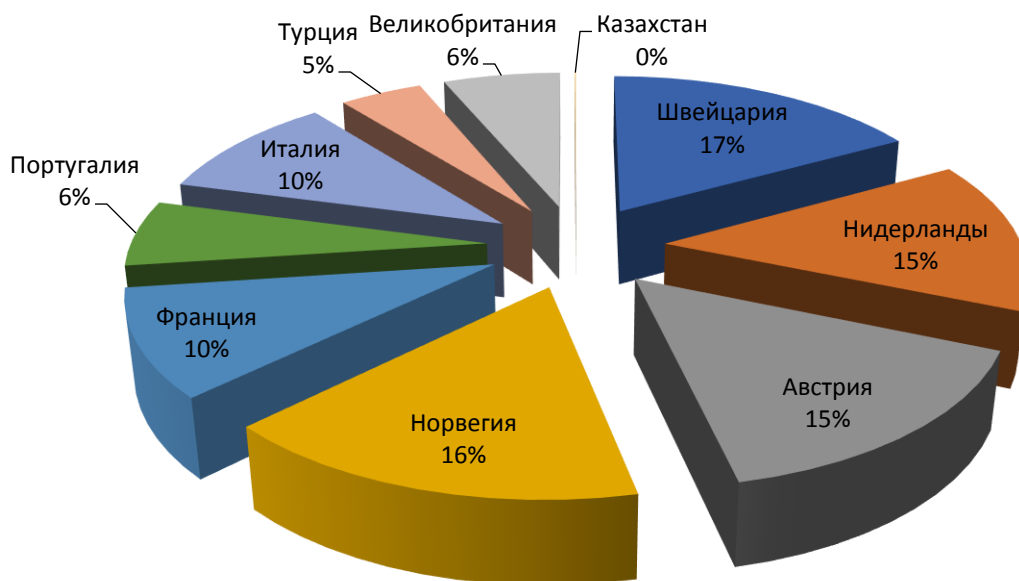


Рисунок 1.6 – Объемы сбора и переработки стеклобоя в европейских странах и в Казахстане

Эффективное управление отходами необходимо для того, чтобы справиться с растущим количеством отходов. Одно из технических решений является использование усовершенствованной системы «продукт-услуга» от машины к машине для сбора отходов стекла.

С точки зрения последующего использования в строительных материалах наибольший интерес представляют отходы листового стекла, так как они характеризуются стабильным химическим составом, минимальным содержанием загрязняющих примесей и возможностью организации постоянного технологического потока переработки [24].

В рамках выполненных исследований в качестве вторичного сырья использовались отходы листового стекла, образующиеся при производстве стекольной продукции в Западно-Казахстанской области. Наличие регионального источника образования стеклобоя является важным фактором для практической реализации технологии, поскольку позволяет создать локальную систему переработки отходов с получением строительной продукции высокой добавленной стоимости.

Основная научно-техническая идея заключается не только в утилизации стеклоотходов, а в их переводе из категории отхода в функциональный компонент сырьевой смеси, участвующий в формировании структуры и свойств силикатного кирпича.

Применение переработанного стеклобоя в технологии силикатного кирпича позволяет обеспечить частичную замену природного кварцевого сырья, повышение активности кремнеземного компонента, регулирование

процессов структурообразования, снижение средней плотности изделий, улучшение теплофизических характеристик стенового материала.

Таким образом, переработка стеклобоя в тонкодисперсный стеклопорошок и его использование в автоклавных силикатных материалах является перспективным направлением создания энергоэффективных строительных материалов нового поколения, соответствующих принципам устойчивого развития и рационального использования природных ресурсов [25].

1.1.2 Экологические последствия накопления стеклоотходов

Интенсивное накопление стеклоотходов является одной из актуальных экологических проблем современной системы обращения с твердыми бытовыми и промышленными отходами. Несмотря на то, что стекло не относится к высокотоксичным материалам, его длительное нахождение в окружающей среде приводит к ряду экологических, технологических и ресурсных проблем, связанных с нарушением принципов рационального природопользования и устойчивого развития [26, 27].

Основная экологическая особенность стеклянных отходов связана с их высокой химической и биологической устойчивостью. Стекло представляет собой аморфный силикатный материал с пространственной структурой, сформированной прочными кремнекислородными связями Si–O–Si. Данная структура обеспечивает высокую долговечность материала, устойчивость к воздействию атмосферных факторов, влаги и большинства химических соединений. Однако именно эти свойства обуславливают крайне низкую скорость естественного разрушения стекла в природных условиях [28].

В отличие от органических компонентов твердых бытовых отходов, которые могут подвергаться биохимическому разложению, стеклянные материалы практически не вовлекаются в естественные природные циклы превращения веществ. В результате накопление стеклобоя на полигонах приводит к долговременному изъятию земельных ресурсов и увеличению нагрузки на природные экосистемы [29, 30].

Одной из наиболее значимых экологических проблем является постоянное увеличение площадей, занятых полигонами твердых бытовых отходов. Захоронение стекла требует значительных территорий, при этом материал сохраняется практически без изменения физического состояния на протяжении длительного периода времени. Это приводит не только к потере полезных земель, но и к необходимости создания новых объектов размещения отходов, что особенно актуально для территорий вблизи крупных городов и промышленных центров [31].

Кроме прямого воздействия на земельные ресурсы, накопление стеклоотходов оказывает отрицательное влияние на эффективность эксплуатации полигонов. Благодаря высокой механической прочности и устойчивости стеклянные фрагменты не уменьшаются в объеме в процессе хранения, ухудшают процессы уплотнения отходов и снижают эффективность использования полигонного пространства [32].

Дополнительным экологическим фактором является возможность механического загрязнения окружающей среды. Острые фрагменты стеклобоя представляют опасность для животных, населения и обслуживающего персонала объектов обращения с отходами. Попадание стеклянных частиц в почвенный слой может изменять его физическую структуру и снижать качество земельных ресурсов [33].

При этом экологическая проблема стеклоотходов заключается не только в их накоплении, но и в нерациональном использовании природного сырьевого потенциала. Производство нового стекла требует добычи значительных объемов кварцевого песка, карбонатных пород и других минеральных компонентов, а также сопровождается значительными энергетическими затратами при высокотемпературной обработке сырья [34].

Захоронение стеклобоя фактически означает потерю готового техногенного кремнеземсодержащего материала, на получение которого уже были затрачены природные ресурсы и энергия. Поэтому с позиции современной концепции устойчивого развития стеклянные отходы необходимо рассматривать не как конечный продукт потребления, а как вторичный сырьевой ресурс для повторного промышленного использования [35].

В последние десятилетия мировая стратегия обращения с отходами постепенно переходит от принципов ликвидации последствий загрязнения к предотвращению образования отходов и их максимальному вовлечению в производственный цикл. Основой данного подхода является концепция циркулярной экономики, предполагающая создание замкнутых технологических циклов, где отходы одной отрасли становятся сырьем для другой [36, 37].

Особое значение такой подход имеет для строительной индустрии, которая является одним из крупнейших потребителей природных минеральных ресурсов. Ежегодно производство строительных материалов требует огромного количества песка, глины, известняка и других видов сырья. Одновременно строительная отрасль обладает высоким потенциалом потребления вторичных ресурсов благодаря большим объемам выпускаемой продукции и возможности введения различных минеральных добавок [38].

Использование стеклобоя в производстве строительных материалов позволяет одновременно решить несколько экологических задач,

уменьшить объемы отходов, направляемых на полигоны, снизить потребление природного кремнеземсодержащего сырья, уменьшить энергетические затраты на получение материалов, снизить углеродный след строительной продукции, сформировать замкнутую систему обращения с минеральными ресурсами [39, 40].

Особенно перспективным направлением является переработка стеклоотходов в тонкодисперсный стеклопорошок с последующим использованием в составе минеральных композиционных материалов. При таком подходе стеклобой перестает выполнять только функцию вторичного заполнителя, а становится активным компонентом, способным участвовать в процессах формирования структуры материала [41].

Для Республики Казахстан проблема рационального использования стеклоотходов также является актуальной. Рост объемов строительства, развитие производства стеклянных изделий и увеличение потребления упаковочных материалов сопровождаются повышением количества образующегося стеклобоя. При этом существующая система переработки стеклянных отходов остается недостаточно развитой, и значительная часть данного сырья не вовлекается в повторный производственный цикл [42].

Особое значение данная проблема имеет для регионов, удаленных от крупных предприятий по производству стекла. Транспортировка стеклобоя на большие расстояния часто является экономически нецелесообразной, что требует разработки локальных технологий переработки отходов непосредственно в регионах их образования [43].

В этом отношении перспективным направлением является использование стеклобоя в производстве местных строительных материалов, в частности силикатного кирпича автоклавного твердения. Данная технология позволяет использовать химический потенциал стекла как источника активного кремнезема и одновременно повысить эксплуатационные характеристики строительной продукции [44].

С позиции экологии применение стеклопорошка в технологии силикатного кирпича обеспечивает двойной положительный эффект. Во-первых, происходит утилизация трудноразлагаемых отходов стекла и снижение нагрузки на окружающую среду. Во-вторых, создается возможность получения энергоэффективных стеновых материалов с пониженной теплопроводностью, что способствует сокращению энергетических затрат при эксплуатации зданий [45].

Таким образом, проблема накопления стеклоотходов должна рассматриваться не только как экологическая задача, связанная с уменьшением объемов захоронения отходов, но и как важное направление развития ресурсосберегающих технологий строительного материаловедения. Использование переработанного стеклобоя в технологии производства силикатного кирпича соответствует

современным принципам устойчивого строительства, рационального природопользования и перехода к низкоуглеродной экономике.

1.1.3 Зарубежный опыт организации переработки стеклобоя

В современных условиях перехода мировой экономики к принципам устойчивого развития и рационального использования природных ресурсов проблема эффективной переработки стеклоотходов рассматривается как одно из важных направлений формирования замкнутых производственных циклов. Развитые страны постепенно переходят от традиционной системы обращения с отходами, основанной преимущественно на захоронении, к комплексным технологиям их сортировки, переработки и повторного использования в различных отраслях промышленности [46, 47].

Особое значение переработка стеклобоя имеет в рамках концепции циркулярной экономики, согласно которой отходы производства и потребления должны рассматриваться как вторичные материальные ресурсы. Такой подход направлен на максимальное сохранение ценности материалов в течение всего жизненного цикла продукции, снижение объемов добычи природного сырья и уменьшение негативного воздействия промышленности на окружающую среду [48–50].

Международный опыт показывает, что эффективность переработки стеклоотходов определяется созданием комплексной системы, включающей, отдельный сбор стеклосодержащих отходов, сортировку по видам и химическому составу стекла, удаление загрязняющих примесей, механическое измельчение и классификацию, повторное использование полученного стеклобоя в промышленном производстве [51].

В странах Европейского союза переработка стеклянных отходов является одним из наиболее развитых направлений обращения с твердыми бытовыми отходами. Высокие показатели повторного использования стекла достигаются благодаря внедрению системы отдельного сбора, законодательного регулирования и стимулирования предприятий, использующих вторичные материалы [52].

Основным направлением переработки стеклобоя традиционно является его возврат в стекольное производство. Использование вторичного стекла позволяет снизить расход природного кварцевого песка, соды и известняка, а также уменьшить энергетические затраты процесса плавления стекломассы за счет более низкой температуры переработки готового стеклянного материала по сравнению с первичным сырьем [53].

Однако мировой опыт показывает, что повторное использование всего объема образующегося стеклобоя исключительно в стекольной промышленности невозможно. Это связано с рядом технологических ограничений, включающих необходимость сортировки стекла по цвету,

удаление загрязнений, требования к химическому составу и чистоте вторичного сырья [54].

Особую проблему представляет смешанный стеклобой, мелкодисперсные фракции после сортировки, а также стеклянные отходы, загрязненные посторонними включениями. Такие материалы часто не соответствуют требованиям стекольной промышленности, но могут эффективно применяться в строительной отрасли, где требования к однородности химического состава менее жесткие [55].

В связи с этим во многих странах активно развивается направление использования стеклоотходов в производстве строительных материалов. Строительная индустрия рассматривается как один из наиболее перспективных потребителей вторичного минерального сырья благодаря большим объемам производства и возможности применения различных видов техногенных компонентов [56].

Наиболее широко изученными направлениями применения переработанного стеклобоя являются использование измельченного стекла в качестве мелкого заполнителя бетонов, получение стеклопорошка как активной минеральной добавки в цементные системы, производство геополимерных материалов, получение теплоизоляционных материалов на основе вспененного стекла, применение в дорожном строительстве, использование в керамических и автоклавных силикатных материалах [57–59].

Исследования зарубежных ученых показывают, что эффективность применения стеклоотходов существенно зависит от степени измельчения материала. При использовании стеклобоя крупной фракции его роль в композиционных материалах преимущественно ограничивается функцией заполнителя. В то же время перевод стекла в тонкодисперсное состояние приводит к повышению его химической активности вследствие увеличения удельной поверхности и доступности аморфного кремнезема для химического взаимодействия [60].

Особое внимание зарубежных исследователей уделяется применению стеклопорошка в цементных и известковых системах. Установлено, что тонкоизмельченное стекло способно проявлять пуццолановые свойства за счет взаимодействия аморфного SiO_2 с гидроксидом кальция Ca(OH)_2 с образованием дополнительных гидросиликатов кальция (C–S–H), которые повышают плотность структуры и эксплуатационные характеристики материалов [61, 62].

В исследованиях последних лет отмечается, что использование стеклопорошка позволяет не только решить проблему утилизации отходов, но и целенаправленно управлять структурообразованием строительных композитов. За счет изменения размера частиц стекла, количества вводимой добавки и условий твердения возможно регулировать плотность, пористость, прочность и долговечность материалов [63].

В ряде зарубежных работ большое внимание уделяется использованию стеклоотходов в автоклавных материалах. Данное направление представляет особый научный интерес, поскольку условия гидротермальной обработки способствуют более активному взаимодействию кремнеземсодержащих компонентов с известью. В результате формируются гидросиликатные соединения кальция различной структуры, определяющие конечные свойства материала [64].

Несмотря на значительное количество исследований по применению стеклобоя в бетонах и цементных композициях, вопросы его использования в технологии плотного силикатного кирпича остаются изученными в меньшей степени. Особенно недостаточно исследованы процессы влияния дисперсности стеклопорошка на гидротермальное структурообразование, формирование микроструктуры и изменение теплофизических характеристик автоклавных силикатных изделий [65].

Для Республики Казахстан использование зарубежного опыта переработки стеклоотходов имеет важное практическое значение. В отличие от стран с развитой инфраструктурой возврата стекла в стекольное производство, региональные условия Казахстана требуют создания локальных технологий переработки стеклобоя непосредственно в местах его образования [66].

Одним из таких решений является использование стеклоотходов предприятий по производству и обработке стекла в качестве сырья для получения строительных материалов. Такой подход позволяет исключить необходимость транспортировки отходов на большие расстояния и сформировать региональные технологические цепочки «отход – переработка – строительный материал» [67].

В рамках данного направления особую перспективу представляет производство энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя. В отличие от традиционной утилизации стекла как заполнителя, предлагаемое направление предусматривает применение стеклопорошка как функционального компонента, участвующего в процессах гидротермального синтеза новых структурообразующих фаз.

Таким образом, анализ зарубежного опыта показывает, что дальнейшее развитие технологий переработки стеклобоя связано не только с увеличением объемов его повторного использования, но и с переходом к созданию материалов с повышенной добавленной стоимостью. Одним из таких перспективных направлений является разработка автоклавных силикатных материалов нового поколения с улучшенными теплофизическими характеристиками на основе вторичных стеклосодержащих ресурсов.

Рассмотренный мировой опыт переработки стеклоотходов показывает, что наиболее перспективным направлением является не простое механическое использование стеклобоя в качестве заменителя

природных заполнителей, а раскрытие его химического потенциала как активного кремнеземсодержащего компонента. Поэтому дальнейшее развитие технологий связано с изучением влияния стеклопорошка на процессы формирования структуры и свойств различных строительных материалов.

В связи с этим в следующем разделе рассмотрены современные научные подходы к использованию стеклоотходов в цементных, керамических и автоклавных силикатных материалах.

1.2 Анализ современных направлений использования стеклоотходов в строительных материалах

Современное развитие строительного материаловедения направлено на создание ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих снижение потребления природного сырья, уменьшение энергетических затрат и вовлечение вторичных материальных ресурсов в производство новых видов строительной продукции. В данном направлении особое место занимают исследования по использованию техногенных кремнеземсодержащих отходов, среди которых значительный научный и практический интерес представляет переработанный стеклобой [68–70].

Стеклоотходы благодаря особенностям химического состава и структуры обладают высоким потенциалом применения в различных строительных системах. Основным компонентом большинства промышленных стекол является диоксид кремния (SiO_2), содержание которого составляет около 65–75 %. При этом в отличие от природного кварцевого сырья кремнезем в стекле находится преимущественно в аморфном состоянии, что определяет его повышенную реакционную способность после механической активации [71, 72].

Анализ современных исследований показывает, что эффективность применения стеклоотходов в строительных материалах определяется не только химическим составом стекла, но и его гранулометрическими характеристиками. Размер частиц является одним из основных факторов, влияющих на роль стекла в структуре материала. В зависимости от степени измельчения стеклобой может выполнять функции, крупного или мелкого заполнителя, микрозаполнителя, активной минеральной добавки, источника реакционноспособного кремнезема, компонента, участвующего в формировании новых фаз [73].

При использовании стеклобоя крупной фракции его действие в основном связано с физическим замещением природных заполнителей. В этом случае стеклянные частицы участвуют преимущественно в формировании зернового каркаса материала, однако их химическая активность ограничена из-за небольшой площади поверхности контакта с вяжущей системой [74].

Вместе с тем многочисленные исследования показывают, что перевод стеклобоя в тонкодисперсное состояние принципиально изменяет механизм его влияния на свойства строительных материалов. Увеличение удельной поверхности стеклопорошка способствует повышению химической активности аморфного SiO_2 и его взаимодействию с соединениями кальция с образованием новых гидратных фаз [75, 76].

Таким образом, современные направления использования стеклоотходов в строительной индустрии можно разделить на несколько основных групп, применение стеклобоя в цементных бетонах и растворах, использование стеклопорошка в качестве активной минеральной добавки, получение геополимерных материалов, производство керамических изделий, получение теплоизоляционных материалов, применение в автоклавных силикатных материалах [77].

1.2.1 Использование стеклобоя в цементных композициях и бетонах

Одним из наиболее изученных направлений применения переработанных стеклоотходов является их использование в технологии цементных бетонов и строительных растворов. Данный интерес обусловлен значительными объемами производства цементных материалов и возможностью замены части природных компонентов вторичным сырьем [78].

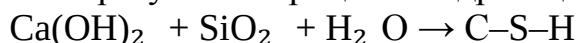
Первоначальные исследования были направлены преимущественно на использование дробленого стеклобоя в качестве частичной замены природного песка или крупного заполнителя. Было установлено, что стеклянные частицы благодаря высокой прочности и низкому водопоглощению могут выполнять функцию заполнителя и обеспечивать получение материалов с удовлетворительными физико-механическими характеристиками [79].

Однако применение стеклобоя крупной фракции в цементных системах сопровождается определенными технологическими ограничениями. Основной проблемой является возможность развития щелочно-кремнеземной реакции (Alkali-Silica Reaction, ASR), возникающей вследствие взаимодействия реакционноспособного кремнезема стекла со щелочами цементного камня [80].

Продукты щелочно-кремнеземной реакции способны увеличиваться в объеме при взаимодействии с влагой, что может приводить к образованию внутренних напряжений, микротрещин и снижению долговечности бетона. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на изменение подходов к применению стекла путем его глубокого измельчения [81].

Установлено, что уменьшение размера частиц стекла до микродисперсного состояния позволяет значительно снизить вероятность негативного проявления ASR и одновременно активировать полезные свойства стеклопорошка. При этом стекло начинает работать не как инертный заполнитель, а как пуццолановый компонент [82].

Механизм действия тонкодисперсного стеклопорошка связан с взаимодействием аморфного диоксида кремния с гидроксидом кальция, который образуется в процессе гидратации портландцемента:



В результате данной реакции формируются дополнительные низкоосновные гидросиликаты кальция, способствующие уплотнению структуры цементного камня, повышению прочности и улучшению долговечности материала [83, 84].

Исследования показывают, что введение оптимального количества стеклопорошка способствует, снижению общей пористости цементного камня, повышению плотности контактной зоны между заполнителем и матрицей, увеличению поздней прочности, улучшению стойкости к воздействию агрессивных сред [85].

При этом эффективность стеклопорошка существенно зависит от его дисперсности. Чем меньше размер частиц, тем выше площадь поверхности и интенсивнее протекают реакции взаимодействия с продуктами гидратации цемента [86].

1.2.2 Применение стеклоотходов в технологии керамических материалов

Другим перспективным направлением является использование стеклобоя в производстве строительной керамики. Введение стеклосодержащих отходов в состав керамических масс позволяет регулировать процессы спекания, фазообразования и формирования структуры изделий [87].

В процессе высокотемпературного обжига стеклянные компоненты способны переходить в вязкотекучее состояние с образованием жидкой фазы, которая способствует уплотнению структуры керамического материала. Благодаря этому возможно снижение температуры обжига и уменьшение энергетических затрат производства [88].

Добавление стеклобоя в керамические материалы оказывает влияние на, процессы спекания, образование стеклофазы, изменение поровой структуры, прочностные характеристики, водопоглощение изделий [89].

При рациональном подборе состава стеклосодержащая добавка способствует формированию более плотной структуры и повышению эксплуатационных свойств керамических изделий. Однако избыточное

количество стекла может привести к чрезмерному образованию жидкой фазы и возникновению технологических дефектов [90].

1.2.3 Использование стеклопорошка в автоклавных силикатных материалах

Особое научное значение имеет применение переработанного стеклосырья в технологии автоклавных силикатных материалов, поскольку химический состав стекла наиболее близок к основному компоненту силикатной системы — кварцевому песку [91].

Традиционный силикатный кирпич получают на основе системы **CaO – SiO₂ – H₂O**

где при автоклавной обработке происходит взаимодействие извести и кремнезема с образованием гидросиликатов кальция, определяющих структуру и прочность материала [92].

Однако природный кварцевый песок характеризуется высокой степенью кристалличности и относительно низкой химической активностью. Для повышения скорости взаимодействия требуется тонкое измельчение части песка или использование активных кремнеземсодержащих компонентов [93].

Стеклопорошок в данном отношении имеет существенное преимущество, так как содержит аморфный SiO₂, обладающий повышенной растворимостью в щелочной среде автоклавного твердения. Это способствует ускоренному формированию гидросиликатных соединений кальция [94].

При гидротермальной обработке происходит взаимодействие:

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 (\text{стекло}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H} \rightarrow \text{toberморитовые структуры}$

Формирование данных фаз обеспечивает создание прочного кристаллогидратного каркаса силикатного кирпича [95].

Кроме участия в химических процессах, тонкодисперсный стеклопорошок оказывает влияние на упаковку частиц сырьевой смеси, изменение характера порового пространства и снижение средней плотности материала [96].

В результате появляется возможность получения силикатного кирпича нового поколения, сочетающего нормативную прочность, пониженную среднюю плотность, уменьшенный коэффициент теплопроводности, повышенную энергоэффективность ограждающих конструкций [97].

Несмотря на имеющиеся исследования, вопросы комплексного влияния содержания стеклопорошка, его дисперсности и технологических параметров автоклавной обработки на формирование структуры и свойств силикатного кирпича остаются недостаточно изученными.

Именно решение данной научной задачи является основой исследований, представленных в настоящей монографии.

Проведенный анализ современных направлений использования стеклоотходов показывает, что наибольший научный интерес представляет переход от простой утилизации стеклобоя к его функциональному применению как активного компонента минеральных систем. В связи с этим дальнейшие исследования должны быть направлены на раскрытие механизма взаимодействия стеклопорошка с известково-кремнеземной системой и установление закономерностей формирования структуры энергоэффективного силикатного кирпича.

1.3. Научное обоснование применения стеклобоя в технологии силикатного кирпича

Развитие современных технологий производства силикатных строительных материалов направлено на повышение эффективности использования сырьевых ресурсов, снижение энергоемкости производства и улучшение эксплуатационных характеристик готовых изделий. Одним из перспективных направлений решения данных задач является модифицирование традиционной известково-кремнеземной системы за счет введения активных техногенных компонентов, способных участвовать в процессах формирования структуры материала [98, 99].

Особое место среди таких компонентов занимает переработанный стеклобой, который благодаря особенностям химического состава и аморфной структуры может рассматриваться не только как заменитель природного кварцевого сырья, но и как функциональная добавка, влияющая на процессы гидротермального структурообразования силикатных материалов [100].

Традиционная технология производства силикатного кирпича основана на взаимодействии извести и кварцевого песка в условиях автоклавного твердения. При повышенной температуре и давлении насыщенного водяного пара происходит растворение кремнезема и образование гидросиликатов кальция различного состава и степени кристалличности [101].

Основные процессы структурообразования можно представить следующим образом $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$, $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (C–S–H)

Образующиеся гидросиликаты кальция формируют цементирующую матрицу, связывающую зерна кварцевого песка и обеспечивающую прочность силикатного материала [102].

Однако природный кварцевый песок характеризуется высокой степенью кристалличности и прочностью связи Si–O в структуре кварца, вследствие чего его химическая активность в условиях гидротермального

твердения является ограниченной. Для повышения интенсивности взаимодействия требуется увеличение температуры, продолжительности автоклавной обработки или дополнительное измельчение части кремнеземного компонента [103].

В отличие от кварцевого песка стеклобой представляет собой аморфный силикатный материал с нарушенной дальнеупорядоченной структурой. Наличие неупорядоченной кремнекислородной сетки способствует более высокой растворимости стеклянной фазы в щелочной среде и повышает способность аморфного SiO_2 вступать во взаимодействие с гидроксидом кальция [104].

При измельчении стеклобоя до тонкодисперсного состояния происходит механическая активация материала, сопровождающаяся увеличением удельной поверхности частиц, повышением количества активных центров на поверхности, нарушением структуры поверхностных связей Si-O-Si , повышением реакционной способности кремнезема [105].

В результате тонкодисперсный стеклопорошок в условиях автоклавной обработки становится активным участником процессов формирования структуры силикатного кирпича.

1.3.1 Особенности системы «известь – кремнезем – вода» при автоклавном твердении

Система $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ является фундаментальной основой технологии силикатных материалов автоклавного твердения. Формирование прочности изделий происходит вследствие сложного комплекса процессов растворения исходных компонентов, переноса ионов в жидкой фазе и последующей кристаллизации новых соединений [106].

На начальном этапе автоклавной обработки происходит гидратация оксида кальция с образованием гидроксида кальция $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$

Образующаяся щелочная среда способствует частичному растворению кремнеземного компонента и переходу кремния в раствор в виде силикатных ионов [107].

Дальнейшее взаимодействие растворенных соединений кальция и кремния приводит к образованию аморфных и слабокристаллических гидросиликатов кальция $\text{Ca}^{2+} + \text{SiO}_4^{4-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}$

Данные соединения являются основной фазой, обеспечивающей формирование прочной структуры силикатного кирпича [108].

При увеличении продолжительности гидротермальной обработки происходит постепенное преобразование первичных C-S-H фаз в более упорядоченные кристаллические образования, среди которых наиболее важное значение имеет тоберморит $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Формирование тоберморитоподобных фаз способствует повышению прочности и долговечности автоклавных материалов [109].

Введение стеклопорошка оказывает влияние на данные процессы за счет увеличения количества доступного активного кремнезема. Аморфный SiO_2 стекла быстрее взаимодействует с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по сравнению с кристаллическим кварцем, что способствует более интенсивному образованию гидросиликатных фаз [110].

1.3.2 Потенциал стеклопорошка как активной кремнезем-содержащей добавки

Научная эффективность использования стеклопорошка определяется его двойным механизмом действия в структуре силикатного материала.

Первый механизм связан с химической активностью стеклянной фазы. Аморфный кремнезем стеклопорошка участвует в реакциях гидротермального синтеза и способствует увеличению количества новообразований C–S–H [111].

Второй механизм заключается в физическом воздействии тонкодисперсных частиц стекла на структуру сырьевой смеси. Частицы стеклопорошка способны заполнять межзерновые пространства между более крупными зернами песка, изменять упаковку компонентов и регулировать формирование поровой структуры [112].

Комплексное влияние стеклопорошка приводит к изменению структуры силикатного кирпича на различных масштабных уровнях:

- на микроуровне формирование дополнительных гидросиликатных соединений, улучшение контакта между частицами, изменение характера кристаллизации;
- на макроуровне снижение средней плотности материала, изменение структуры порового пространства, уменьшение коэффициента теплопроводности [113].

Важным фактором является дисперсность стеклопорошка. С уменьшением размера частиц увеличивается площадь контакта между стеклом и известковой составляющей, что повышает степень участия стекла в процессах структурообразования [114].

1.3.3 Перспективы получения энергоэффективных стеновых материалов

Современные требования к строительным материалам предусматривают комплексное сочетание высокой эксплуатационной надежности и повышенной энергоэффективности. Для стеновых материалов одним из основных показателей является коэффициент

теплопроводности, определяющий способность ограждающих конструкций снижать теплопотери зданий [115].

Традиционный силикатный кирпич обладает высокой прочностью и долговечностью, однако характеризуется сравнительно высокой средней плотностью, что обуславливает повышенные значения теплопроводности. Поэтому снижение плотности материала при сохранении нормативной прочности является одной из важных задач совершенствования технологии силикатных изделий [116].

Использование переработанного стеклобоя позволяет решить данную задачу за счет направленного управления структурой материала.

Формирование энергоэффективной структуры связано с несколькими процессами изменением гранулометрического состава сырьевой смеси, регулированием процессов образования гидросиликатов кальция, оптимизацией поровой структуры, снижением средней плотности материала [117].

При этом принципиально важным является сохранение баланса между уменьшением теплопроводности и обеспечением требуемых прочностных характеристик. Избыточное снижение плотности может привести к ухудшению механических свойств, поэтому необходим научно обоснованный подбор количества и дисперсности стеклопорошка [118].

Таким образом, использование переработанного стеклобоя в технологии силикатного кирпича представляет собой не только экологический способ утилизации отходов, но и эффективный метод управления структурообразованием автоклавных материалов.

Комплексное воздействие стеклопорошка на процессы формирования гидросиликатных фаз, микроструктуру и поровое пространство создает научные предпосылки для получения энергоэффективного силикатного кирпича нового поколения, предназначенного для повышения теплозащитных характеристик ограждающих конструкций зданий.

1.4 Исследования ученых стран СНГ в области разработки силикатных материалов с использованием техногенного кремнезем-содержащего сырья

Значительный вклад в развитие научных основ получения силикатных материалов автоклавного твердения внесли научные школы стран СНГ, где были сформированы фундаментальные представления о процессах взаимодействия извести и кремнеземсодержащих компонентов в гидротермальных условиях, механизмах образования гидросиликатов кальция и управлении структурой строительных материалов.

Одним из основных направлений исследований являлось изучение закономерностей формирования структуры силикатных изделий в системе

$\text{CaO-SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. В работах отечественных и российских ученых показано, что свойства силикатного кирпича определяются не только химическим составом сырьевой смеси, но и активностью кремнеземного компонента, тонкостью его измельчения, условиями прессования и режимами автоклавной обработки [117–119].

Исследования в области технологии силикатных материалов показали, что повышение эффективности процессов гидротермального твердения возможно за счет применения активированных кремнеземсодержащих добавок. При увеличении дисперсности кремнеземного компонента возрастает площадь контакта между частицами SiO_2 и Ca(OH)_2 , что способствует более интенсивному образованию гидросиликатов кальция и повышению эксплуатационных свойств изделий [120, 121].

Большой вклад в развитие теоретических представлений о структурообразовании силикатных материалов внесли исследования, посвященные использованию промышленных отходов и вторичного минерального сырья. Было установлено, что техногенные материалы, содержащие аморфный или слабокристаллизованный кремнезем, способны проявлять повышенную химическую активность в условиях автоклавного твердения и участвовать в формировании цементирующих новообразований [122–124].

Особое внимание исследователей уделялось применению золошлаковых отходов, металлургических шлаков, микрокремнезема и других кремнеземсодержащих компонентов при производстве стеновых материалов. Полученные результаты подтвердили возможность направленного регулирования процессов фазообразования и формирования структуры за счет изменения природы кремнеземной составляющей сырьевой смеси [125–127].

В исследованиях казахстанских ученых значительное внимание уделено вопросам рационального использования местного минерального сырья и промышленных отходов в производстве строительных материалов. Разработаны научные основы комплексного использования природных и техногенных ресурсов Казахстана с получением эффективных стеновых, теплоизоляционных и композиционных материалов [128–130]. При этом анализ выполненных исследований показывает, что, несмотря на значительный объем работ по применению различных техногенных кремнеземсодержащих компонентов, вопросы использования именно переработанного стеклобоя в технологии плотного силикатного кирпича изучены недостаточно.

В отличие от золы-уноса, шлаков и других минеральных добавок, стеклобой обладает рядом специфических особенностей: высоким содержанием аморфного SiO_2 , наличием щелочных оксидов Na_2O и K_2O , возможностью механической активации путем тонкого помола,

способностью активно взаимодействовать с известковым компонентом при автоклавном твердении. Поэтому дальнейшее развитие исследований связано с изучением влияния содержания и дисперсности стеклопорошка на процессы гидротермального структурообразования силикатных материалов, что является основной научной задачей настоящей монографии.

Выводы по главе 1

1. Выполненный анализ современного состояния образования, накопления и переработки стеклоотходов показал, что стеклобой является одним из наиболее массовых видов твердых коммунальных и промышленных отходов. Несмотря на химическую инертность стекла и отсутствие прямой экологической опасности, его длительное накопление на полигонах приводит к необоснованному изъятию земельных ресурсов, увеличению площади полигонов, росту затрат на их содержание и утрате значительных объемов ценного вторичного минерального сырья. В связи с этим переработка стеклобоя рассматривается как одно из приоритетных направлений реализации принципов циркулярной экономики и ресурсосбережения.

2. Анализ мирового опыта показал, что в странах Европейского союза, Японии, Южной Кореи, США и Китае сформированы эффективные системы сбора, сортировки и переработки стеклоотходов, позволяющие возвращать в хозяйственный оборот более 70–90 % стеклянной тары и промышленных стеклоотходов. Основным направлением использования переработанного стекла остается стекольная промышленность, однако в последние годы интенсивно развивается применение стеклопорошка в производстве цементных композитов, бетонов, строительной керамики, геополимеров, пеностекла и автоклавных силикатных материалов.

3. Проведенный анализ отечественных исследований показал, что в Республике Казахстан вопросы комплексной переработки стеклобоя пока находятся на стадии становления. Значительная часть стеклянных отходов продолжает складироваться на полигонах, тогда как существующие объемы переработки не обеспечивают полного использования образующегося вторичного сырья. Особенно актуальна данная проблема для Западно-Казахстанской области, где функционируют предприятия, перерабатывающие стекло, однако отсутствуют технологии масштабного использования стеклопорошка в производстве строительных материалов.

4. Изучение научных публикаций зарубежных и отечественных исследователей позволило установить, что эффективность применения стеклопорошка определяется его аморфным строением, высокой дисперсностью и повышенной реакционной способностью по сравнению с природным кварцевым песком. Благодаря аморфному состоянию диоксида

кремния стеклопорошок способен активно взаимодействовать с гидроксидом кальция, образуя дополнительные гидросиликаты кальция, что открывает широкие возможности его применения в автоклавных силикатных материалах.

5. Анализ современного состояния исследований в области силикатного кирпича показал, что большинство научных работ посвящено частичной замене кварцевого песка стеклопорошком или введению различных минеральных добавок с целью повышения прочности. Вместе с тем значительно меньше исследований направлено на комплексное управление структурообразованием силикатного кирпича посредством регулирования фазового состава, поровой структуры и теплофизических характеристик материала. Особенно недостаточно изучены процессы совместного использования стеклопорошка с другими техногенными алюмосиликатными компонентами.

6. Установлено, что повышение требований к энергоэффективности зданий обуславливает необходимость разработки новых видов силикатных стеновых материалов с пониженной средней плотностью и коэффициентом теплопроводности при сохранении нормативной прочности, морозостойкости и долговечности. Решение данной задачи невозможно без глубокого изучения закономерностей гидротермального фазообразования и формирования микроструктуры силикатного кирпича.

7. Проведенный анализ научной литературы позволил установить, что механизм влияния стеклопорошка на процессы автоклавного твердения до настоящего времени не имеет однозначного научного объяснения. В различных работах стеклопорошок рассматривается как инертный заполнитель, активная минеральная добавка или источник аморфного кремнезема. Отсутствуют комплексные исследования, объединяющие результаты механических испытаний, теплофизических характеристик, рентгенофазового анализа и электронной микроскопии для объяснения процессов структурообразования силикатного кирпича.

8. Анализ литературных источников показал перспективность использования не только стеклопорошка, но и других техногенных алюмосиликатных материалов — золы-уноса тепловых электростанций и керамзитовой пыли предприятий строительной индустрии. Однако исследования, посвященные совместному использованию указанных отходов в технологии силикатного кирпича, единичны и не позволяют сформировать научно обоснованные рекомендации для промышленного производства.

9. Установлено, что современные научные исследования преимущественно ориентированы на изучение отдельных свойств силикатного кирпича, тогда как вопросы комплексного управления системой «состав — структура — свойства» остаются недостаточно разработанными. Недостаточно исследованы закономерности взаимосвязи

химического состава техногенных добавок, их дисперсности, морфологии частиц, процессов гидротермального синтеза гидросиликатных соединений, формирования порового пространства и конечных эксплуатационных характеристик материала.

10. На основании анализа отечественных и зарубежных исследований сформулирована научная гипотеза настоящей работы, заключающаяся в том, что целенаправленное использование переработанного стеклопорошка как источника активного аморфного кремнезема, а также его совместное применение с алюмосиликатными техногенными компонентами (золой-уноса и керамзитовой пылью) позволит управлять процессами гидротермального структурообразования, формированием гидросиликатной матрицы и порового пространства силикатного кирпича, обеспечивая снижение средней плотности и коэффициента теплопроводности при сохранении нормативной прочности и долговечности изделий.

11. Проведенный литературный обзор подтвердил научную и практическую актуальность разработки технологии производства энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя. Реализация данной технологии позволяет одновременно решать задачи рационального использования природных минеральных ресурсов, комплексной переработки промышленных отходов, снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и повышения энергетической эффективности зданий и сооружений.

12. Выполненный анализ отечественных и зарубежных публикаций определил направления дальнейших экспериментальных исследований, представленных в последующих главах монографии. Они включают изучение влияния содержания и дисперсности стеклопорошка на процессы структурообразования силикатного кирпича, исследование совместного использования стеклопорошка с золой-уноса и керамзитовой пылью, установление закономерностей формирования фазового состава и микроструктуры методом СЭМ и РФА, а также разработку научно обоснованной технологии промышленного производства энергоэффективного силикатного кирпича с использованием техногенного минерального сырья.

ГЛАВА 2. СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛОБОЯ

2.1 Характеристика исходных сырьевых материалов

Разработка энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя требует комплексного исследования исходных сырьевых компонентов, поскольку их химико-минералогический состав, гранулометрические характеристики и физико-технические свойства определяют процессы формирования структуры и эксплуатационные характеристики готового материала.

Технология силикатного кирпича основана на использовании многокомпонентной минеральной системы, в которой каждый компонент выполняет определенную структурообразующую функцию. Основными составляющими традиционной силикатной массы являются кварцевый песок, строительная известь и вода. В процессе автоклавной обработки данные компоненты взаимодействуют с образованием гидросиликатов кальция, формирующих прочный кристаллизационный каркас материала.

В рамках выполненных исследований традиционная сырьевая система была модифицирована путем введения переработанного стеклобоя в виде тонкодисперсного стеклопорошка, выполняющего роль дополнительного активного кремнеземсодержащего компонента. Такой подход направлен на управление процессами гидротермального структурообразования и получение силикатного кирпича с улучшенными теплофизическими характеристиками.

Выбор сырьевых компонентов осуществлялся с учетом следующих основных требований: доступность и стабильность сырьевой базы, возможность использования региональных природных и вторичных ресурсов, соответствие химического состава требованиям автоклавного твердения, возможность формирования прочных гидросиликатных соединений кальция, обеспечение снижения средней плотности и коэффициента теплопроводности материала.

Исходя из указанных требований, объектами исследований являлись кварцевый песок как основной природный кремнеземсодержащий компонент, воздушная строительная известь как источник оксида кальция, переработанный стеклобой как техногенный источник аморфного диоксида кремния.

Особое внимание при разработке состава уделялось возможности частичного замещения природного кварцевого песка стеклопорошком. Данное решение связано не только с необходимостью утилизации стеклоотходов, но и с различием структурного состояния кремнезема в природном песке и стекле.

Кварцевый песок содержит диоксид кремния преимущественно в кристаллической форме. Высокая энергия связи Si–O в структуре кварца обуславливает его относительно низкую химическую активность при автоклавном твердении. Поэтому образование гидросиликатных фаз происходит преимущественно на поверхности зерен кварца и требует определенной продолжительности гидротермальной обработки.

В отличие от кварцевого песка, стекло представляет собой аморфный силикатный материал с нарушенной пространственной структурой. При переводе стеклосырья в тонкодисперсное состояние происходит увеличение площади поверхности частиц и повышение количества активных центров, что способствует ускорению взаимодействия аморфного SiO₂ с гидроксидом кальция.

Таким образом, введение стеклосырья в состав силикатной массы позволяет рассматривать его не как инертный заменитель песка, а как функциональный компонент, влияющий на процессы формирования структуры материала.

Научная идея применения переработанного стеклосырья заключается в комплексном воздействии стеклосырья на силикатную систему, химическое воздействие — участие аморфного SiO₂ в реакциях образования дополнительных гидросиликатов кальция, физическое воздействие — изменение гранулометрического состава сырьевой смеси и упаковки частиц, структурное воздействие — регулирование порового пространства и формирование более энергоэффективной структуры материала.

В процессе автоклавного твердения тонкодисперсный стеклосырьевой порошок взаимодействует с продуктами гидратации извести $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ после чего активный кремнезем стекла вступает в реакцию: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 (\text{аморф.}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}$.

Формирующиеся гидросиликаты кальция обеспечивают образование цементирующей матрицы, связывающей минеральные частицы и определяющей прочность силикатного кирпича. При оптимальных условиях гидротермального синтеза происходит дальнейшее структурное преобразование C–S–H фаз с формированием более стабильных тоберморитоподобных соединений: $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Именно образование данных фаз является одним из основных факторов формирования эксплуатационных свойств автоклавных силикатных материалов.

Следовательно, исследование физико-химических характеристик каждого сырьевого компонента является необходимым этапом разработки рационального состава энергоэффективного силикатного кирпича. Особое значение имеют, химический состав, минералогический состав, дисперсность, морфология частиц, способность компонентов участвовать в процессах гидротермального синтеза.

Комплексное изучение указанных характеристик позволяет установить взаимосвязь между составом исходной сырьевой смеси, процессами структурообразования при автоклавном твердении и конечными свойствами получаемого строительного материала.

2.1.1 Кварцевый песок как основной кремнеземсодержащий компонент силикатной массы

Кварцевый песок является основным сырьевым компонентом при производстве силикатного кирпича автоклавного твердения и выполняет одновременно несколько важных функций: является источником кремнезема для образования гидросиликатных соединений кальция, формирует минеральный каркас материала и оказывает определяющее влияние на процессы структурообразования и эксплуатационные характеристики готовых изделий.

В традиционной технологии силикатного кирпича содержание кварцевого песка составляет основную часть сырьевой смеси. В процессе автоклавного твердения песок взаимодействует с известковым компонентом в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ с образованием гидросиликатов кальция различного состава и степени кристалличности, которые обеспечивают формирование прочности материала.

Основной химический процесс формирования структуры силикатного кирпича может быть представлен следующим образом, $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

В результате данной реакции образуются низкоосновные гидросиликаты кальция (C-S-H), которые выполняют роль цементирующих соединений, связывающих зерна кварцевого песка в единую прочную структуру.

При дальнейшей гидротермальной обработке при повышенной температуре и давлении насыщенного водяного пара происходит постепенная кристаллизация гидросиликатных фаз с образованием более устойчивых структур, включая тоберморитоподобные соединения: $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Формирование данных фаз является основным фактором, обеспечивающим прочность и долговечность силикатных материалов автоклавного твердения.

В качестве основного кремнеземсодержащего компонента в проведенных исследованиях использовался кварцевый песок, применяемый на действующем предприятии по производству силикатного кирпича АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов». Данное сырье характеризуется стабильностью состава и промышленной доступностью, что является важным условием последующего внедрения разработанной технологии.

Кварцевый песок представляет собой рыхлую осадочную горную породу, основным минералом которой является кварц (SiO_2). Наряду с кварцем в составе песков могут присутствовать незначительные количества примесных минералов, содержащих соединения алюминия, железа, кальция и магния.

Основным показателем качества песка для производства силикатного кирпича является содержание диоксида кремния. Высокое содержание SiO_2 обеспечивает возможность протекания реакций гидротермального синтеза и образования необходимого количества гидросиликатных соединений кальция.

Химический состав исследуемого кварцевого песка представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав кварцевого песка, используемого для производства силикатного кирпича

Компонент	Содержание, масс. %
SiO_2	85–95
Al_2O_3	2–5
Fe_2O_3	0,5–2,0
CaO	0,5–2,0
MgO	0,2–1,0
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,5–2,0
Потери при прокаливании	1–3

Высокое содержание диоксида кремния подтверждает возможность использования данного песка в качестве основного кремнеземсодержащего компонента для получения силикатных материалов.

Однако необходимо учитывать, что в природном кварцевом песке кремнезем находится преимущественно в кристаллическом состоянии. Кристаллическая структура кварца характеризуется высокой степенью упорядоченности и прочными химическими связями Si-O-Si , что обуславливает его сравнительно низкую химическую активность в условиях автоклавного твердения.

В связи с этим взаимодействие кварцевого песка с гидроксидом кальция происходит преимущественно на поверхности зерен, а центральная часть крупных частиц остается практически неизменной и выполняет роль минерального наполнителя.

Эффективность участия кварцевого песка в процессах структурообразования зависит от следующих факторов химического состава, содержания активного кремнезема, размера частиц, формы зерен, удельной поверхности, степени контакта с известковым компонентом.

Особое значение имеет гранулометрический состав песка. Размер и распределение частиц определяют плотность упаковки сырьевой смеси, условия прессования и характер формирования структуры после автоклавной обработки. Гранулометрическая характеристика исследуемого песка приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав кварцевого песка

Размер фракции, мм	Содержание, %
Более 1,25	1–3
0,63–1,25	10–20
0,315–0,63	35–45
0,16–0,315	25–35
Менее 0,16	5–15

Представленный гранулометрический состав обеспечивает формирование плотной упаковки частиц сырьевой смеси и получение изделий с необходимыми физико-механическими характеристиками.

Вместе с тем высокая доля кристаллического кварца ограничивает возможность дальнейшего повышения эффективности процессов гидротермального синтеза. Для интенсификации образования гидросиликатных фаз традиционно используют дополнительный помол части песка, увеличение продолжительности автоклавирования или введение активных кремнеземсодержащих добавок.

В рамках настоящих исследований предложен другой подход — частичная замена природного кварцевого песка переработанным стеклобоем в виде тонкодисперсного стеклопорошка.

Научное преимущество данного решения заключается в различии структурного состояния кремнезема, в кварцевом песке — SiO_2 находится в кристаллической форме с низкой растворимостью, в стеклопорошке — SiO_2 находится в аморфном состоянии с повышенной реакционной способностью.

Аморфный кремнезем стеклопорошка в условиях щелочной среды автоклава легче вступает во взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, способствуя более интенсивному образованию гидросиликатных соединений кальция.

Таким образом, кварцевый песок обеспечивает формирование минерального каркаса силикатного кирпича, а введение тонкодисперсного стеклопорошка позволяет повысить активность кремнеземной составляющей системы и управлять процессами структурообразования.

Комплексное использование природного кварцевого песка и переработанного стеклобоя создает предпосылки для получения силикатного кирпича с оптимальным сочетанием прочности, пониженной средней плотности и улучшенных теплофизических характеристик.

2.1.2 Строительная воздушная известь как источник кальциевого компонента при формировании гидросиликатных фаз

Одним из основных компонентов сырьевой смеси при производстве силикатного кирпича автоклавного твердения является строительная воздушная известь, выполняющая функцию источника кальциевой составляющей, необходимой для образования гидросиликатных соединений кальция. Именно взаимодействие продуктов гидратации извести с кремнеземсодержащими компонентами определяет процессы структурообразования и формирование эксплуатационных свойств силикатного материала.

В отличие от керамических стеновых материалов, где формирование структуры происходит в результате высокотемпературного спекания, получение силикатного кирпича основано на химическом взаимодействии компонентов в условиях гидротермального синтеза. При этом известь является активным реагентом, обеспечивающим образование новых цементирующих фаз в системе: $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$

Данная система является основой технологии силикатных материалов автоклавного твердения, где при повышенной температуре и давлении насыщенного водяного пара формируются гидросиликаты кальция различной структуры и степени кристалличности.

В качестве кальцийсодержащего компонента в производстве силикатного кирпича применяется негашеная воздушная известь, основным активным соединением которой является оксид кальция (CaO). После смешивания сырьевых компонентов с водой происходит процесс гидратации извести: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + Q$

В результате реакции образуется гидроксид кальция Ca(OH)_2 , который является основным источником ионов Ca^{2+} при последующих процессах гидротермального взаимодействия с кремнеземом.

Образование Ca(OH)_2 сопровождается изменением структуры известковой составляющей, увеличением дисперсности и формированием высокоактивной щелочной среды, необходимой для растворения кремнеземных компонентов.

Качество строительной извести оказывает существенное влияние на технологические процессы изготовления силикатного кирпича. Основными характеристиками известкового компонента являются, содержание активных $\text{CaO} + \text{MgO}$, скорость гидратации, степень обжига известняка, количество непогасившихся зерен, дисперсность, равномерность изменения объема.

Для производства силикатных изделий наиболее предпочтительно применение извести с высоким содержанием активного оксида кальция, поскольку именно количество доступного CaO определяет интенсивность образования гидросиликатных фаз.

Основные показатели строительной извести, используемой в технологии силикатного кирпича, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные физико-химические характеристики строительной воздушной извести

Показатель	Значение
Активные CaO + MgO, %	70–90
Содержание MgO, %	≤5
CO ₂ , %	≤5–7
Непогасившиеся зерна, %	≤5
Время гашения, мин	5–25
Остаток на сите №008, %	≤10
Насыпная плотность, кг/м ³	800–1000

Важнейшим фактором эффективности извести является ее реакционная способность. Недостаточно обожженная известь содержит остаточный карбонат кальция (CaCO₃), который практически не участвует в процессах гидротермального синтеза и выполняет роль инертного наполнителя.

С другой стороны, пережженная известь характеризуется низкой скоростью гидратации вследствие формирования плотной структуры зерен CaO. Наличие таких частиц может привести к неравномерному изменению объема и снижению качества силикатных изделий.

После гидратации извести образующийся Ca(OH)₂ взаимодействует с кремнеземным компонентом сырьевой смеси: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Образующиеся гидросиликаты кальция (C–S–H) являются основной цементирующей фазой силикатного кирпича. Их образование происходит за счет растворения кремнезема, переноса ионов кальция и кремния через жидкую фазу и последующей кристаллизации новых соединений.

На начальной стадии автоклавного твердения формируются слабокристаллизованные C–S–H фазы, которые обеспечивают первичное связывание частиц песка. При увеличении продолжительности гидротермальной обработки происходит постепенное преобразование структуры гидросиликатов с образованием более устойчивых фаз.

Особое значение имеет формирование низкоосновных гидросиликатов кальция тоберморитовой структуры: $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Тоберморитовые образования характеризуются пластинчатой и волокнистой морфологией и обеспечивают создание прочного пространственного каркаса силикатного материала.

В традиционной силикатной системе эффективность взаимодействия извести ограничивается низкой химической активностью кварцевого песка,

поскольку природный SiO_2 находится в кристаллическом состоянии. Поэтому значительная часть кварцевых зерен после автоклавирования сохраняется как минеральный каркас.

Введение переработанного стеклобоя в виде тонкодисперсного стеклопорошка существенно изменяет характер взаимодействия известкового компонента с кремнеземной составляющей.

Это связано с тем, что стеклопорошок содержит аморфный SiO_2 , обладающий повышенной растворимостью в щелочной среде $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В результате создаются условия для более интенсивного образования гидросиликатных фаз: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 (\text{стекло}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H} \rightarrow \text{тоберморитовые соединения}$

Таким образом, при использовании стеклопорошка известь выполняет не только традиционную функцию связующего компонента, но становится активным участником процессов направленного формирования структуры материала.

В модифицированной системе: известь – кварцевый песок – стеклопорошок – вода

реализуется комплексный механизм структурообразования, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обеспечивает источник кальциевых ионов, кварцевый песок формирует основной минеральный каркас, стеклопорошок поставляет активный аморфный кремнезем, продукты гидротермального синтеза связывают компоненты в прочную структуру.

При рациональном соотношении извести и активного кремнеземного компонента обеспечивается образование оптимального количества C–S–H фаз, что способствует повышению прочности при одновременном снижении средней плотности и теплопроводности силикатного кирпича.

Следовательно, качество и активность строительной воздушной извести являются определяющими факторами эффективности процессов гидротермального синтеза. Управление взаимодействием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с природным и техногенным кремнеземом является основой разработки энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя.

2.1.3 Физико-химическая характеристика стеклобоя как вторичного кремнеземсодержащего сырья

Одним из основных направлений исследований, выполненных в рамках программы ПЦФ 2024–2026 гг., является разработка научных основ использования переработанного стеклобоя в качестве активного кремнеземсодержащего компонента при получении энергоэффективного силикатного кирпича автоклавного твердения.

Выбор стеклобоя в качестве объекта исследования обусловлен совокупностью экологических, сырьевых и материаловедческих факторов.

С одной стороны, отходы стекла относятся к трудноразлагаемым компонентам твердых бытовых и промышленных отходов, длительное накопление которых приводит к увеличению экологической нагрузки. С другой стороны, с позиции химического состава стекло представляет собой ценный вторичный силикатный материал с высоким содержанием диоксида кремния.

В качестве исходного техногенного сырья использовался стеклобой, образующийся в результате производственной деятельности предприятия ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС» (г. Уральск, Западно-Казахстанская область), специализирующегося на изготовлении и переработке стекольной продукции.

В процессе изготовления стеклянных изделий часть материала образуется в виде технологических отходов при резке листового стекла, обработке стеклопакетов, получении нестандартных изделий, удалении дефектной продукции.

Данный вид стеклобоя представляет особый интерес для дальнейшей переработки, поскольку в отличие от смешанных бытовых стеклоотходов характеризуется стабильностью химического состава, низким содержанием органических загрязнений, отсутствием значительного количества посторонних включений, возможностью организации постоянного промышленного источника сырья.

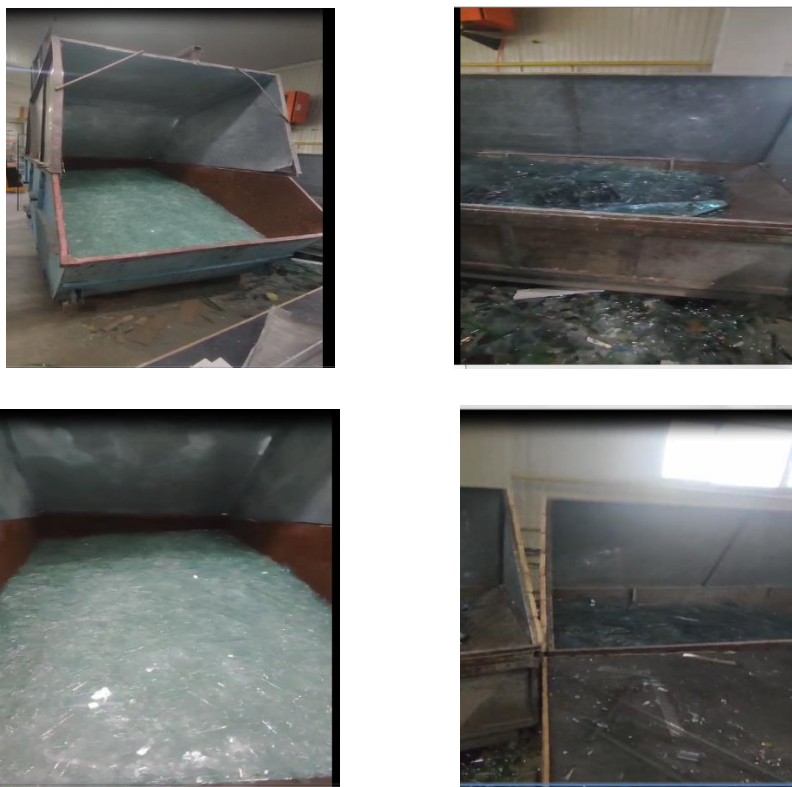


Рисунок 2.1 – Производственный стеклобой ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС», используемый как вторичное кремнеземсодержащее сырье



Рисунок 2.2 – Общий вид стеклобоя предоставленных от
ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС»

На рисунке 2.2 показаны партии листового стеклобоя, доставленные в научно-учебно-производственный центр для проведения экспериментальных исследований. Применение производственного стеклобоя, а не специально изготовленного лабораторного материала, обеспечивает практическую направленность исследований и позволяет оценить перспективы промышленного внедрения разработанной технологии.

Основу химического состава исследуемого стеклобоя составляет натрий-кальций-силикатная система, характерная для большинства видов строительного листового стекла.

Химический состав стеклобоя приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Химический состав стеклобоя ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС»

Оксид	Содержание, масс. %
SiO_2	70–75
$\text{Na}_2 \text{O}$	12–15
CaO	7–10
MgO	2–4
$\text{Al}_2 \text{O}_3$	1–3
$\text{Fe}_2 \text{O}_3$	0,1–1,0
$\text{K}_2 \text{O}$	до 1
Прочие оксиды	до 1

Высокое содержание SiO_2 является основным фактором, определяющим возможность применения стеклобоя в качестве альтернативного кремнеземного компонента силикатной массы.

Однако принципиальное отличие стекла от природного кварцевого песка заключается не только в химическом составе, а прежде всего в структурном состоянии кремнезема.

В кварцевом песке диоксид кремния находится преимущественно в кристаллической форме $\alpha\text{-SiO}_2$. Кристаллическая решетка кварца характеризуется высокой степенью упорядоченности и прочностью связей Si-O-Si , что ограничивает скорость его растворения в условиях автоклавного твердения.

Стекло, напротив, является аморфным материалом, в котором отсутствует дальний порядок расположения структурных элементов. Такая особенность приводит к повышенной химической активности стеклянной фазы.

Аморфная структура стекла характеризуется, нарушением регулярности кремнекислородной сетки, наличием энергетически активных участков, повышенной способностью взаимодействовать с щелочной средой, большей растворимостью по сравнению с кварцем.

Именно наличие аморфного SiO_2 является основой использования стеклопорошка как функциональной добавки в системе $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Для повышения активности стеклобоя осуществлялась его механическая переработка с получением тонкодисперсного стеклопорошка.

2.2 Технологические методы подготовки переработанного стеклобоя

Разработка технологии производства энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя требует получения вторичного кремнеземсодержащего сырья со стабильными физико-химическими характеристиками. Как показано в предыдущем разделе, отходы стекла обладают высоким содержанием аморфного диоксида кремния и потенциально могут выступать активным компонентом гидротермального синтеза. Однако непосредственное использование крупнокускового стеклобоя в составе силикатной массы невозможно вследствие его неоднородности, значительных размеров частиц и низкой удельной поверхности. Поэтому одним из основных этапов исследований, выполненных в рамках программы ПЦФ 2024–2026 гг., стала разработка рациональной технологии подготовки стеклобоя, обеспечивающей получение стеклопорошка с заданным гранулометрическим составом и повышенной реакционной способностью. Технологическая схема подготовки вторичного сырья включала последовательные операции: прием и накопление стеклобоя, первичное

дробление, разделение по фракциям, дополнительный помол крупных частиц и получение однородного стеклопорошка. Такая последовательность позволила максимально использовать весь объем поступающих отходов и исключить образование вторичных производственных отходов.

Исходным сырьем являлся стекlobой, образующийся при изготовлении стеклопакетов на предприятии ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС» (г. Уральск) а также отходы тарного стекла. Данное предприятие ежегодно образует около 2000 тонн стекольных отходов, что позволяет рассматривать его как стабильный источник вторичного кремнеземсодержащего сырья для промышленного производства силикатных материалов. После накопления на предприятии стекlobой транспортировался в Научно-учебно-производственный центр ЗКАТУ имени Жангир хана, где проводилась его подготовка к дальнейшей переработке.

Технологическая подготовка включала следующие стадии: стекlobой → предварительное дробление → измельчение → классификация → стеклопорошок заданной дисперсности (рис. 2.2, 3, 4)

На рисунке представлены общий вид молотковой дробилки и процесс дробления стекlobоя. Использование ударного принципа разрушения обеспечивает эффективное измельчение стеклянных отходов с сохранением их аморфной структуры, что имеет принципиальное значение для последующего участия стеклопорошка в реакциях гидротермального синтеза.



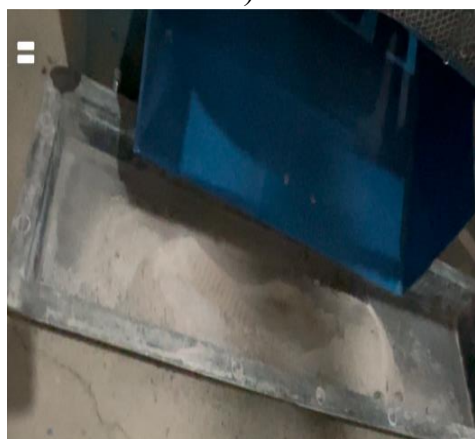
Рисунок 2.3 – Технологический процесс дробления и измельчения стекlobоя



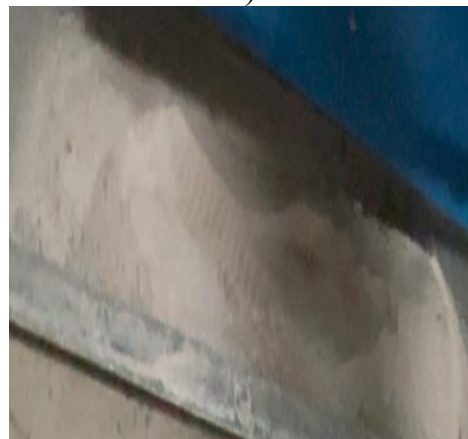
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.4 – Общий вид молотковой дробилки и процесс дробления стеклобоя. а – молотковая дробилка марки LZPS 300/500, б – процесс дробления стеклобоя, в и г – общий вид дробленого стеклобоя.



Рисунок 2.5 - Процесс забора первично дробленного стеклобоя из нижней приемной металлической ёмкости молотковой дробилки.

После дробления полученный стеклопорошок подвергались ситовому анализу путем просивания через комплект сит. Результаты ситового анализа представлены в таблице 2.5

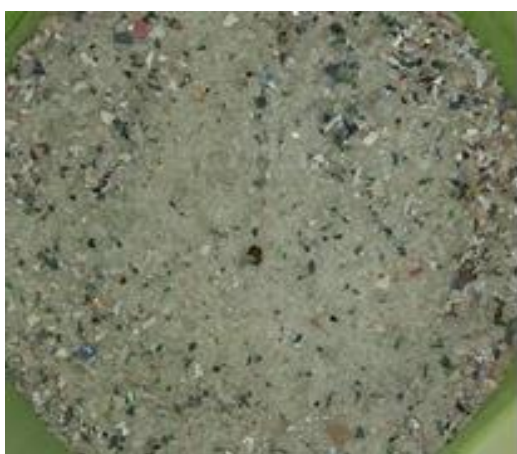
Таблица 2.5 – Результаты ситового анализа после дробления стеклобоя от ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС»

Наименование сырья	Содержание фракции, мм в %				
	0,063-063	0,63 – 1,25	1,25 – 5,0	Менее 0,063	Более 10
Стеклобой от ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС»	1,5	89,0	8,0	0,5	5,0

Как показывают результаты ситового анализа после дробления на молотковой дробилке марки LZPS 300/500 в качестве основной фракции является фракции 0,63 – 1,25 мм (89%) (рис.2.6, 2.7)



Рисунок 2.6 – Общий вид разделенных фракции стеклобоя



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.7 – Макрофотографии стеклобоя разделенных по фракциям: а) фракции первичного дробления 1,25 – 10 мм, б) фракции 0,63 - 1,25 мм, в) фракции 0,063 - 0,63 мм, г) фракции менее 0,063 мм

Этот показатель фракции наиболее близко показателю фракции кварцевого песка используемого для производства силикатного кирпича на базе АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов». Поэтому для проведения дальнейших исследований использовали именно данную фракцию принимая его как оптимальную. При этом фракции стеклобоя 1,25 – 5,0 и более 10 мм составляет всего 13,0%. Данные фракции отправляли на накопительные емкости для последующего помола с помощью шаровой мельницы (рис.2.8).

Несмотря на высокую долю оптимальной фракции после первичного дробления, часть стеклобоя сохраняла размеры, превышающие технологические требования. Для полной переработки сырья и повышения его реакционной способности крупные частицы подвергались дополнительному помолу на лабораторной шаровой мельнице МШЛ-300.

Основной задачей данного этапа являлось получение стеклопорошка с высокой удельной поверхностью, обеспечивающей эффективное взаимодействие аморфного кремнезема с гидроксидом кальция в процессе автоклавного твердения.

Помол производился до полного прохождения через сито 1,0 мм. После чего их добавляли в основную фракцию. Что касается фракции 0,063-063 то ввиду незначительного количества их тоже использовали в составе основной оптимальной фракции.

Помол стеклобоя на шаровой мельнице позволил получить стеклопорошок с высокой степенью дисперсности. Механическая активация сопровождалась увеличением удельной поверхности частиц и количества активных центров, что способствует ускоренному растворению аморфного SiO_2 и интенсификации образования гидросиликатов кальция.



Рисунок 2.8 – Процесс помола стеклобоя на шаровой мельнице марки МШЛ 300

Механическая активация стеклобоя является важным этапом подготовки сырья. При уменьшении размера частиц происходит значительное увеличение удельной поверхности и повышение реакционной способности материала.

Основные изменения при измельчении стекла увеличение площади контакта стекла с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образование новых активных поверхностей, разрушение части связей $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, повышение скорости гидротермального взаимодействия.

После тонкого измельчения стеклопорошок приобретает свойства активного минерального компонента (рис.2.9)



Рисунок 2.9 – Полученный тонкодисперсный стеклопорошок для введения в силикатную массу

Полученный стеклопорошок вводился в заводскую силикатную массу в качестве активной минеральной добавки. В отличие от традиционного кварцевого песка, стеклопорошок характеризуется большей реакционной способностью благодаря аморфной структуре, что способствует более интенсивному протеканию процессов гидротермального синтеза.

Для проведения экспериментов с целью определения влияния содержания стеклопорошка оптимальной фракции (0,63 – 1,25 мм) на физико-механические свойства силикатного кирпича в аккредитованной лаборатории АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов» были изготовлены образцы-цилиндры размером 50х50х50 мм с добавлением готовой заводской силикатной массы, используемой для производства силикатного кирпича, и молотого стеклопорошка в количестве 2,0-5,0%.

Сырьевая смесь на основе силикатной массы с добавлением стеклопорошка представлена на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Компонентная смесь в системе
«силикатная масса – стеклопорошок»

Фотография демонстрирует однородное распределение стеклопорошка в силикатной массе перед прессованием. Равномерность распределения активной добавки является одним из ключевых условий формирования однородной микроструктуры силикатного кирпича и получения стабильных физико-механических и теплофизических характеристик после автоклавной обработки.

Несмотря на то, что кварцевый песок и стеклопорошок выполняют в составе силикатной массы сходную функцию источника кремнезема, их физико-химические свойства и участие в процессах гидротермального структурообразования существенно различаются. Эти различия обусловлены прежде всего структурным состоянием диоксида кремния, химической активностью материала, особенностями взаимодействия с гидроксидом кальция и характером образования гидросиликатных фаз в процессе автоклавного твердения.

Кварцевый песок, содержащий преимущественно кристаллический диоксид кремния, формирует минеральный каркас силикатного кирпича и отличается относительно низкой реакционной способностью в условиях гидротермального синтеза. В отличие от него переработанный стеклопорошок характеризуется аморфной структурой, повышенной удельной поверхностью и значительно большей химической активностью, благодаря чему способен интенсивнее участвовать в реакциях образования гидросиликатов кальция.

Следовательно, частичная замена природного кварцевого песка тонкодисперсным стеклопорошком позволяет не только решить задачу рациональной утилизации стеклоотходов, но и целенаправленно управлять процессами структурообразования силикатного кирпича, создавая предпосылки для получения материала с улучшенными физико-механическими и теплофизическими характеристиками.

Для более наглядной оценки особенностей рассматриваемых кремнеземсодержащих компонентов в таблице 2.6 приведено их сравнительное сопоставление по основным физико-химическим и технологическим показателям, определяющим эффективность использования в технологии производства силикатного кирпича.

Таблица 2.6 – Сравнительная характеристика кварцевого песка и переработанного стеклопорошка

Показатель	Кварцевый песок	Стеклопорошок
Основной компонент	SiO ₂	SiO ₂
Структура SiO ₂	Кристаллическая	Аморфная
Химическая активность	Низкая	Повышенная
Растворимость в Ca(OH) ₂	Ограниченная	Более высокая
Участие в C–S–H образовании	Поверхностное	Активное
Влияние на структуру	Каркас материала	Модификация структуры

При введении стеклопорошка в силикатную массу происходит изменение механизма структурообразования. В традиционной системе: известь + кварцевый песок + вода основное взаимодействие происходит только на поверхности зерен кварца. В модифицированной системе: известь + кварцевый песок + стеклопорошок + вода дополнительно реализуется взаимодействие активного аморфного кремнезема стекла: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 (\text{аморфный}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}$

Образующиеся дополнительные гидросиликаты кальция способствуют формированию более развитой цементирующей структуры.

Таким образом, переработанный стеклом в виде тонкодисперсного стеклопорошка является не просто заменителем природного песка, а

активным компонентом, позволяющим управлять процессами гидротермального структурообразования.

Использование стеклопорошка обеспечивает рациональную утилизацию стеклоотходов, снижение потребления природного кварцевого сырья, повышение активности кремнеземной составляющей, изменение структуры силикатного материала, возможность получения кирпича с пониженной плотностью и улучшенными теплофизическими характеристиками. Полученные закономерности являются научной основой разработки энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя.

2.3 Разработка составов сырьевой смеси и технологических параметров производства силикатного кирпича с использованием стеклопорошка

Одним из основных этапов выполненных исследований являлась разработка рационального состава силикатной массы и технологических параметров производства энергоэффективного силикатного кирпича с использованием тонкодисперсного стеклопорошка. Решение данной задачи предусматривало комплексное исследование влияния содержания переработанного стеклобоя на процессы формования, гидротермального структурообразования и формирование физико-механических и теплофизических свойств готовых изделий.

При разработке экспериментальной программы в качестве базового был принят промышленный состав силикатной массы, применяемый на действующем предприятии АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов». Такой подход обеспечил возможность объективной оценки влияния стеклопорошка на свойства материала без изменения существующей технологии производства и позволил максимально приблизить лабораторные исследования к условиям промышленного изготовления силикатного кирпича.

На основании анализа литературных данных, результатов предварительных экспериментов и выполненных теоретических исследований были выбраны три уровня модифицирования силикатной массы путем частичной замены кварцевого песка тонкодисперсным стеклопорошком: 2, 3 и 5 % от массы кремнеземсодержащего компонента. Выбранный диапазон обеспечивал возможность определения оптимального содержания стеклопорошка, при котором достигается улучшение теплофизических характеристик при сохранении нормативной прочности силикатного кирпича.

В ходе исследований технологический процесс включал следующие основные стадии подготовку кварцевого песка, подготовку строительной извести, получение тонкодисперсного стеклопорошка, дозирование

компонентов, приготовление силикатной массы, полусухое прессование образцов, автоклавную обработку, испытание физико-механических и теплофизических свойств, исследование фазового состава и микроструктуры. Общая последовательность экспериментальных исследований представлена на рисунке 2.11.

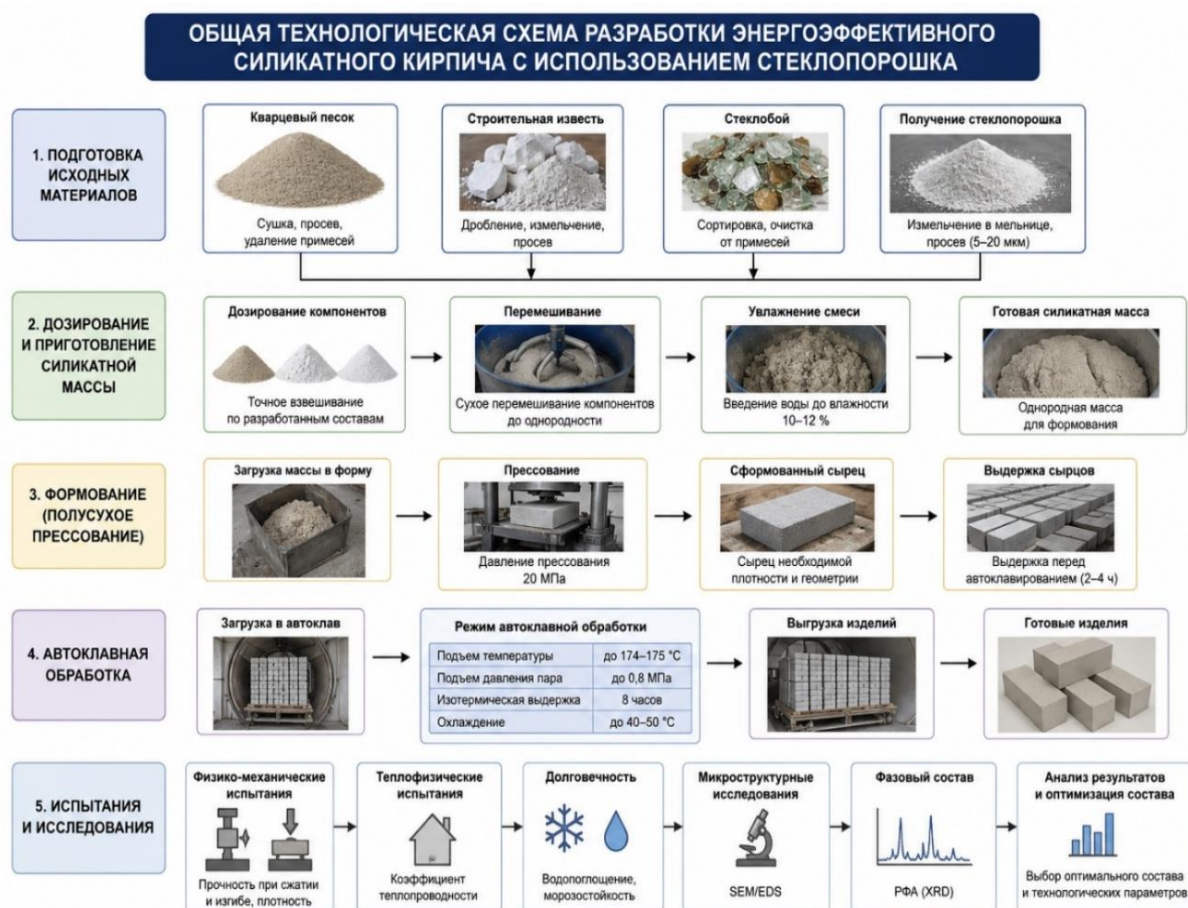


Рисунок 2.11 – Общая технологическая схема разработки энергоэффективного силикатного кирпича с использованием стеклопорошка

Представленная схема отражает полный цикл экспериментальных исследований — от подготовки исходных сырьевых материалов до получения силикатного кирпича и комплексной оценки его эксплуатационных характеристик. Такой подход обеспечил возможность установить взаимосвязь между составом сырьевой смеси, параметрами технологического процесса и формированием структуры материала.

Перед приготовлением сырьевой смеси все компоненты подвергались предварительной подготовке. Кварцевый песок просушивали до постоянной массы, строительную известь измельчали и просеивали, а стеклопорошок получали путем механической активации стеклобоя до заданной степени дисперсности. После дозирования компонентов

осуществлялось их тщательное перемешивание до получения однородной силикатной массы.



Рисунок 2.12 – Подготовка компонентов и приготовление силикатной массы

Фотография иллюстрирует процесс приготовления силикатной массы. Однородное распределение стеклопорошка в объеме смеси является важным условием равномерного протекания процессов гидротермального синтеза и формирования структуры силикатного кирпича.

2.3.1 Формование экспериментальных образцов

Формование силикатных образцов осуществлялось методом полусухого прессования на лабораторном гидравлическом прессе. Перед прессованием в смесь вводилось расчетное количество воды, обеспечивающее оптимальную влажность формовочной массы.

Полученная смесь загружалась в металлические формы, после чего производилось прессование при заданном удельном давлении. Выбранный режим прессования обеспечивал получение образцов с высокой плотностью упаковки и минимальным количеством технологических дефектов.



Рисунок 2.12 – Формование экспериментальных образцов силикатного кирпича

Процесс прессования оказывает существенное влияние на плотность упаковки сырьевой смеси и формирование исходной структуры образцов. Равномерное распределение давления обеспечивает получение изделий с минимальной неоднородностью и стабильными геометрическими размерами.

2.3.2 Автоклавная обработка силикатных образцов

После прессования образцы подвергались автоклавной обработке в лабораторном автоклаве. Режим автоклавирования соответствовал промышленной технологии производства силикатного кирпича и включал подъем температуры до 174 °С, повышение давления насыщенного водяного пара до 0,8 МПа, изотермическую выдержку 8 часов, постепенное охлаждение до температуры окружающей среды.

В процессе автоклавной обработки происходило взаимодействие гидроксида кальция с кремнеземной составляющей смеси и образование гидросиликатов кальция, обеспечивающих формирование прочной структуры силикатного материала.



Рисунок 2.13 – Автоклавная обработка экспериментальных образцов

Автоклавная обработка является основным этапом технологии силикатного кирпича. В этих условиях протекают процессы гидротермального синтеза гидросиликатов кальция, определяющих прочность, плотность и долговечность материала.

После завершения автоклавной обработки экспериментальные образцы были подвергнуты комплексным испытаниям для определения физико-механических, теплофизических и структурных характеристик. Анализ полученных результатов позволил установить влияние содержания стеклопорошка на процессы формирования структуры силикатного кирпича и определить оптимальный состав сырьевой смеси.

Выводы по главе 2

1. Обоснован выбор исходных сырьевых материалов для получения энергоэффективного силикатного кирпича автоклавного твердения. В качестве базовых компонентов использованы кварцево-полевошпатовый песок месторождения «Меловые горки», строительная воздушная известь и переработанный стеклобой, образующийся на предприятии ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС».

2. Установлено, что кварцевый песок с высоким содержанием SiO_2 выполняет одновременно две функции: является основным кремнеземсодержащим компонентом гидротермального синтеза и формирует жесткий минеральный каркас силикатного материала. Вместе с

тем кристаллическое состояние кварца ограничивает его реакционную способность в условиях автоклавного твердения.

3. Показано, что строительная воздушная известь является основным источником кальциевого компонента в системе $\text{CaO-SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. В результате гидратации CaO образуется Ca(OH)_2 , который обеспечивает щелочную среду, растворение кремнезема и последующее формирование цементирующих гидросиликатов кальция.

4. Научно обоснована возможность использования переработанного стеклобоя не только как частичной замены природного кварцевого песка, но и как активного структурообразующего компонента. Аморфное состояние SiO_2 , наличие щелочных оксидов и возможность тонкого измельчения определяют повышенную реакционную способность стеклопорошка при гидротермальной обработке.

5. Установлены принципиальные различия между кварцевым песком и стеклопорошком. Кварцевый песок преимущественно выполняет каркасную функцию, тогда как тонкодисперсный стеклопорошок активно участвует в образовании С-S-H- и тоберморитоподобных соединений, изменяет межзерновые контакты и регулирует поровую структуру материала.

6. Разработана последовательная технология подготовки стеклоотходов, включающая прием и сортировку стеклобоя, удаление загрязняющих примесей, первичное дробление, фракционирование, дополнительный помол и получение стеклопорошка заданной дисперсности. Такая схема обеспечивает комплексное использование стеклоотходов и минимизирует образование вторичных отходов.

7. Подтверждена технологическая пригодность оборудования, использованного в рамках проекта ПЦФ: молотковой дробилки LZPS 300/500 для первичного дробления и шаровой мельницы МШЛ-300 для дополнительного измельчения стеклобоя. Применение данного оборудования позволяет получать сырье с воспроизводимыми гранулометрическими характеристиками.

8. Определено, что механическая активация стеклобоя сопровождается увеличением удельной поверхности, образованием новых реакционноспособных участков и повышением доступности аморфного кремнезема для взаимодействия с гидроксидом кальция. Вследствие этого стеклопорошок приобретает свойства активной минеральной добавки.

9. Разработан общий технологический цикл получения модифицированного силикатного кирпича, включающий подготовку сырья, дозирование компонентов, сухое перемешивание, увлажнение смеси, полусухое прессование, выдержку сырца, автоклавное твердение и последующий комплекс испытаний.

10. Обосновано применение формовочной влажности 10–12 % и полусухого прессования как технологических параметров,

обеспечивающих однородность сырьевой смеси, требуемую плотность сырца и устойчивость геометрической формы образцов до автоклавной обработки.

11. Определен рациональный промышленно ориентированный режим автоклавного твердения: подъем температуры до 174–175 °С, давление насыщенного водяного пара около 0,8 МПа, изотермическая выдержка 6–8 часов и контролируемое охлаждение. Применение данного режима обеспечивает протекание гидротермальных реакций без принципиального изменения существующей заводской технологии.

12. Сформирован комплекс методов исследования, включающий определение химического и гранулометрического состава сырья, средней плотности, прочности при сжатии и изгибе, водопоглощения, морозостойкости и коэффициента теплопроводности, а также изучение фазового состава методом РФА и микроструктуры методом СЭМ/EDS.

13. Показано, что сочетание стандартных физико-механических испытаний с микроструктурными и фазовыми методами позволяет установить причинно-следственную взаимосвязь между составом сырьевой смеси, режимами технологической обработки, формированием гидросиликатной матрицы и эксплуатационными свойствами готового кирпича.

14. Сформулирована основная методологическая схема дальнейших исследований: состав сырьевой смеси → дисперсность стеклопорошка → условия формования → гидротермальный синтез → фазовый состав и микроструктура → плотность и пористость → прочность, теплопроводность и долговечность.

15. Полученные результаты главы 2 сформировали достоверную экспериментально-методическую основу для последующего изучения влияния содержания и дисперсности стеклопорошка на структуру и свойства силикатного кирпича, а также для исследования комплексных систем со стеклопорошком, золой-уноса и керамзитовой пылью.

ГЛАВА 3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СТЕКЛОПОРОШКА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

3.1 Научная концепция и постановка экспериментальных исследований

Силикатный кирпич автоклавного твердения широко используется при возведении наружных и внутренних стен благодаря доступности сырьевой базы, стабильности геометрических размеров, высокой огнестойкости и достаточной механической прочности. Вместе с тем традиционные силикатные изделия характеризуются сравнительно высокой средней плотностью и теплопроводностью, что ограничивает эффективность их применения в современных ограждающих конструкциях с повышенными требованиями к теплозащите.

Повышение энергоэффективности силикатного кирпича предполагает формирование такой структуры материала, при которой снижение плотности и коэффициента теплопроводности не сопровождается критическим уменьшением прочности, морозостойкости и долговечности. Решение данной задачи требует не простого введения легкого наполнителя, а направленного регулирования процессов гидротермального фазообразования и порообразования.

В настоящих исследованиях в качестве структурно-модифицирующего компонента использован стеклопорошок, полученный путем дробления и последующего тонкого помола отходов листового стекла. Научная предпосылка его применения основана на двух взаимосвязанных особенностях стекла:

1. диоксид кремния в стекле находится преимущественно в аморфном состоянии и характеризуется более высокой реакционной способностью по сравнению с кристаллическим кварцем;

2. натрий-кальций-силикатное стекло содержит щелочные оксиды, прежде всего Na_2O , способные влиять на растворение кремнезема и кинетику образования гидросиликатов кальция в автоклавных условиях.

Таким образом, стеклопорошок рассматривался не как инертный заменитель кварцевого песка, а как активный кремнеземсодержащий компонент и внутренний источник щелочного воздействия на систему: $\text{CaO-SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$.

Предполагалось, что варьирование содержания и дисперсности стеклопорошка позволит регулировать интенсивность растворения кремнеземсодержащих компонентов, соотношение аморфных, полукристаллических и кристаллических гидросиликатных фаз, плотность и однородность цементирующей матрицы, размер, распределение и взаимосвязанность пор, среднюю плотность и коэффициент

теплопроводности, прочностные и эксплуатационные характеристики силикатного кирпича.

Цель исследований данного этапа заключалась в установлении закономерностей влияния содержания и дисперсности стеклопорошка из отходов листового стекла на структурообразование, фазовый состав, плотность, теплопроводность, прочность, водопоглощение и морозостойкость автоклавного силикатного кирпича при сохранении технологических режимов, приближенных к действующему промышленному производству.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- получение стеклопорошка различных фракционно-дисперсных составов;
- разработка составов силикатной массы с частичной заменой традиционного кремнеземсодержащего компонента стеклопорошком;
- изготовление образцов методом полусухого прессования;
- проведение автоклавной обработки по промышленному режиму;
- определение физико-механических и теплофизических показателей;
- исследование микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии;
- изучение фазового состава методом рентгеновской дифракции;
- установление взаимосвязи «состав — дисперсность — структура — свойства»;
- определение рационального содержания и дисперсности стеклопорошка.

Основные результаты, положенные в основу настоящей главы, получены в первой статье Scopus авторского коллектива, посвященной управлению плотностью и теплопроводностью силикатного кирпича путем варьирования содержания и дисперсности стеклопорошка. В статье представлены составы смесей, результаты физико-механических и теплофизических испытаний, СЭМ-изображения, рентгеновская дифрактограмма и концептуальная интерпретация механизма структурообразования.

3.2 Сырьевые материалы и организация эксперимента

В качестве базового сырья использовали промышленную силикатную массу АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов», применяемую для серийного производства силикатного кирпича автоклавного твердения. В состав заводской массы входили кварцево-полевошпатовый песок и строительная известь.

Строительная известь являлась источником кальциевого компонента. Содержание активных оксидов $\text{CaO} + \text{MgO}$ составляло не менее 90 %. При затворении водой оксид кальция гидратировался с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который в дальнейшем взаимодействовал с кремнеземсодержащими компонентами в условиях повышенной температуры и давления.

В качестве модифицирующей добавки применяли стеклопорошок из отходов листового стекла. Его подготовка включала: сбор стеклобоя → удаление посторонних включений → дробление → помол → классификацию по размеру частиц. Фотографии исходного стеклобоя, молотковой дробилки LZPS 300/500, процесса дробления и дополнительного помола на шаровой мельнице МШЛ-300 приведены в Главе 2.

Эти материалы подтверждают, что стеклопорошок получали из реальных производственных отходов ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС», а его подготовка осуществлялась на оборудовании, приобретенном и использованном в рамках проекта ПЦФ. После дробления основной продукт был представлен фракцией 0,63–1,25 мм, а крупные частицы дополнительно измельчали до полного прохождения через контрольное сито.

Для фундаментального исследования влияния дисперсности из подготовленного материала были сформированы три диапазона стеклопорошка с медианным размером частиц, $d_{50} = 30\text{--}50$ мкм, $d_{50} = 20\text{--}40$ мкм, $d_{50} = 10\text{--}20$ мкм.

С уменьшением размера частиц возрастали удельная поверхность, площадь контакта с известковым компонентом и потенциальная реакционная способность аморфного SiO_2 .

При разработке экспериментальной программы исследования исходили из предположения, что эффективность использования стеклопорошка определяется не только его количеством в составе силикатной массы, но и степенью механической активации, характеризуемой размером частиц. Поэтому эксперимент был построен по принципу последовательного увеличения содержания стеклопорошка с одновременным уменьшением его медианного размера (d_{50}), что обеспечило возможность установить взаимосвязь между дисперсностью вторичного кремнеземсодержащего сырья, процессами гидротермального фазообразования и эксплуатационными характеристиками силикатного кирпича. Во всех составах формовочная влажность поддерживалась на уровне 10–12 % от массы сухой смеси, что позволило исключить влияние данного фактора на результаты исследований. Разработанные составы сырьевых смесей представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Составы сырьевых смесей для исследования влияния содержания и дисперсности стеклопорошка

Обозначение состава	Заводская силикатная масса, мас. %	Стеклопорошок, мас. %	d_{50} стеклопорошка, мкм	Вода к сухой смеси, %
Контроль	100	0	—	10–12
Состав 1	95	5	30–50	10–12
Состав 2	90	10	20–40	10–12
Состав 3	85	15	10–20	10–12

Представленный план эксперимента предусматривал одновременное повышение содержания и увеличение тонкости помола стеклопорошка. Это позволило оценить совокупное действие двух технологических факторов — количества активного стеклосодержащего компонента и площади его реакционной поверхности.

При интерпретации результатов необходимо учитывать, что влияние содержания и дисперсности в данной серии не разделено полностью на два независимых фактора: каждому уровню содержания соответствует определенный диапазон d_{50} . Поэтому полученные закономерности характеризуют комплексное изменение системы.

3.3 Приготовление смесей, формование и автоклавная обработка

Сухие компоненты дозировали по массе в соответствии с разработанными составами и перемешивали до получения визуально однородной композиции. После сухого перемешивания вводили расчетное количество воды, обеспечивающее формовочную влажность 10–12 %. Увлажненную массу повторно перемешивали и выдерживали в течение 5–10 минут для равномерного распределения влаги и стабилизации структуры полусухой смеси.

Формование осуществляли методом полусухого прессования при удельном давлении 20 МПа, соответствующем промышленным условиям производства силикатного кирпича. Для различных испытаний изготавливали цилиндрические образцы $\varnothing 50 \times 50$ мм — для определения средней плотности и прочности при сжатии, призматические образцы $40 \times 40 \times 160$ мм — для определения прочности при изгибе, образцы требуемых

размеров — для измерения теплопроводности, водопоглощения и морозостойкости.

Количество параллельных образцов каждого состава составляло не менее пяти для испытаний на сжатие и не менее трех для испытаний на изгиб и определения теплофизических характеристик.

После формования образцы подвергали автоклавному твердению по режиму, максимально приближенному к действующей заводской технологии, подъем температуры до 174–175 °С в течение 1,5–2 часов, повышение давления насыщенного водяного пара примерно до 0,8 МПа, изотермическая выдержка в течение 6–8 часов, контролируемое снижение температуры и давления продолжительностью около 2 часов.

Применение промышленного режима автоклавирования позволило исключить искусственное улучшение показателей за счет специальных лабораторных условий и подтвердить возможность внедрения разработанных составов без принципиального изменения действующей технологической линии.

В ходе гидротермальной обработки протекали последовательные процессы:

1. гидратация извести и формирование щелочной водной среды;
2. растворение поверхности кварцевых зерен и частиц аморфного стекла;
3. перенос кальциевых и силикатных ионов через жидкую фазу;
4. образование первичных слабоупорядоченных C–S–H-соединений;
5. дальнейшее преобразование части гидросиликатов в более упорядоченные фазы;
6. формирование цементирующей матрицы, связывающей зерна кремнеземсодержащего сырья.

Наличие Na^+ , поступающего из стеклопорошка, ускоряет растворение кремнезема, однако одновременно может изменять кинетику кристаллизации тоберморита. В результате формируется более сложное соотношение между аморфными, полукристаллическими и кристаллическими гидросиликатами кальция. Эта особенность является одним из центральных положений научной интерпретации полученных результатов.

3.4 Методы определения свойств и исследования структуры

Среднюю плотность определяли по отношению массы высушенного образца к его геометрическому объему. Прочность при сжатии устанавливали испытанием цилиндрических образцов до разрушения.

Прочность при изгибе определяли на призмах методом трехточечного нагружения.

Водопоглощение рассчитывали по увеличению массы предварительно высушенных образцов после насыщения водой. Морозостойкость оценивали методом последовательного замораживания и оттаивания с контролем состояния образцов и сохранения прочностных характеристик.

Коэффициент теплопроводности определяли стационарным методом установившегося теплового потока на приборе ИТП-МГ4. Для каждого состава проводили не менее трех измерений с последующим расчетом среднего значения.

Микроструктуру исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Hitachi TM4000 Plus. Анализ выполняли на свежих сколах автоклавированных образцов, что позволило изучить морфологию новообразований, состояние межзерновых контактов и характер формирования цементирующей матрицы. При необходимости локальный элементный состав определяли методом энергодисперсионной спектроскопии.

Рентгенофазовый анализ проводили на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением и β -фильтром. Параметры съемки напряжение — 35 кВ, ток — 20 мА, схема съемки — θ – 2θ , скорость регистрации — 2 град/мин.

Анализ дифрактограмм был направлен на идентификацию кварца, тоберморитоподобных соединений и оценку вклада слабокристаллической и аморфной C–S–H-фазы.

3.5 Влияние содержания и дисперсности стеклопорошка на среднюю плотность

Средняя плотность является интегральной характеристикой, отражающей степень упаковки частиц, объем и характер порового пространства, количество новообразований и полноту формирования межзерновых контактов. Для стеновых материалов данный показатель имеет особое значение, поскольку тесно связан как с механическими свойствами, так и с теплопроводностью.

Результаты испытаний показали устойчивое снижение средней плотности по мере увеличения количества и тонкости помола стеклопорошка. У контрольного образца средняя плотность составляла около 1780 кг/м³, тогда как для состава с 15 % стеклопорошка и $d_{50} = 10$ –20 мкм она снижалась до 1580 кг/м³. Относительное уменьшение составило приблизительно 11 %.

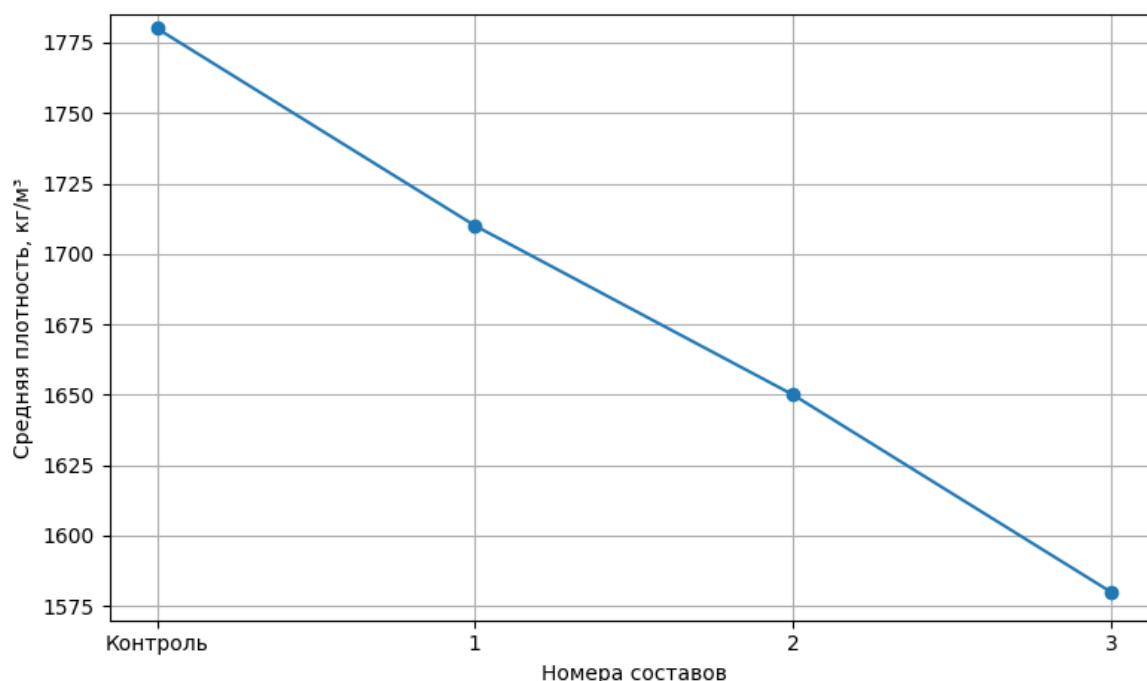


Рисунок 3.1 – Влияние содержания и дисперсности стеклопорошка на среднюю плотность автоклавированных образцов силикатного кирпича

Снижение средней плотности нельзя объяснить только различием истинной плотности кварцевого песка и стекла. Полученный эффект связан с комплексным изменением процессов структурообразования.

Во-первых, тонкодисперсные частицы стекла быстрее растворяются в щелочной среде автоклава и участвуют в формировании гидросиликатных соединений кальция.

Во-вторых, присутствие Na^+ изменяет кинетику гидротермальных реакций и соотношение между аморфной C–S–H-фазой и более упорядоченными кристаллическими продуктами.

В-третьих, изменение гранулометрического состава смеси влияет на упаковку частиц и развитие порового пространства. Вместо относительно плотной кристаллической структуры с выраженными крупными межзерновыми границами формируется более однородная гелеобразная матрица с повышенной долей мелких пор.

Таким образом, снижение средней плотности следует рассматривать как результат структурной перестройки материала, а не как простое разбавление традиционной силикатной массы менее плотной добавкой.

3.6 Влияние стеклопорошка на коэффициент теплопроводности

Наиболее значимый эффект применения стеклопорошка установлен при исследовании теплофизических характеристик. Коэффициент

теплопроводности контрольного силикатного материала составлял приблизительно 0,78 Вт/(м·К). При введении 15 % стеклопорошка с $d_{50} = 10\text{--}20$ мкм он снижался до 0,55 Вт/(м·К).

Таким образом, снижение теплопроводности достигало около 29–30 %, то есть было существенно более выраженным, чем уменьшение средней плотности.

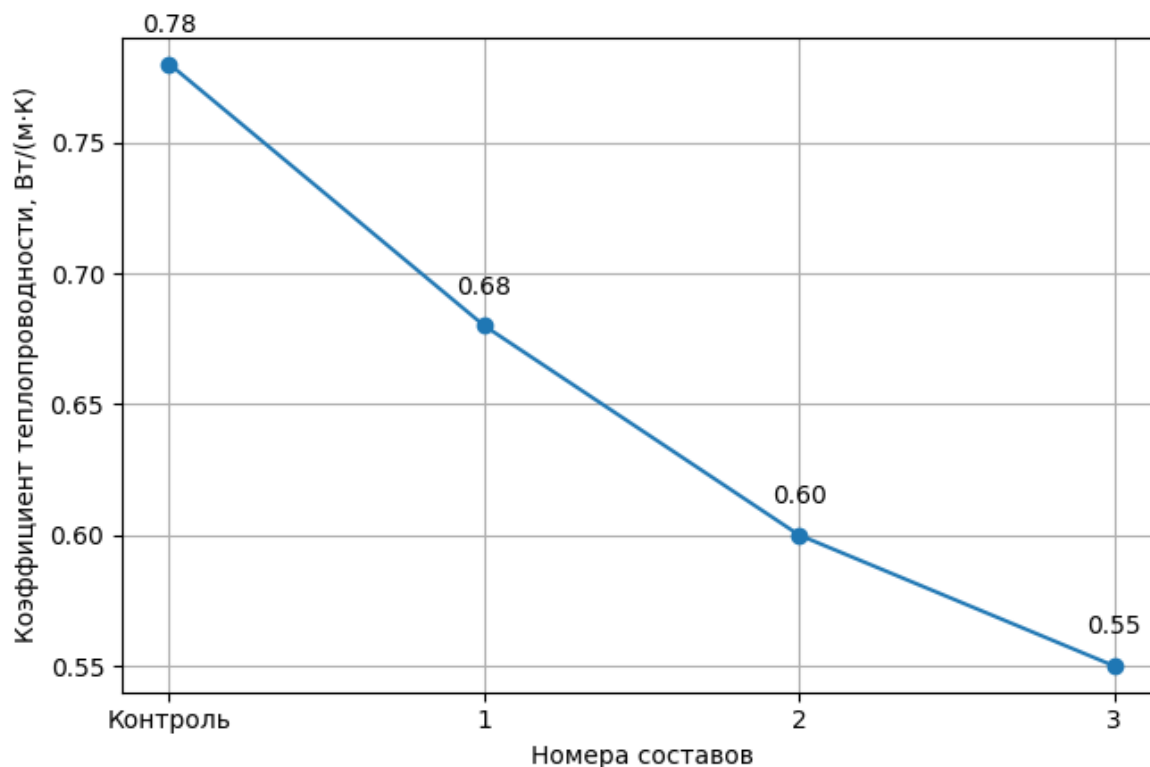


Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициента теплопроводности силикатного кирпича от содержания и дисперсности стеклопорошка

Несоответствие относительных изменений плотности и теплопроводности подтверждает, что теплофизический эффект обусловлен не только общим увеличением объема пор. Определяющее значение имеет изменение их качественных характеристик: размера, формы, степени замкнутости, взаимосвязанности, распределения в объеме материала, состояния твердой гидросиликатной матрицы.

При формировании мелких гелевых и капиллярных пор увеличивается термическое сопротивление материала. Одновременно сокращается доля непрерывных твердофазных контактов, обеспечивающих интенсивную передачу тепла. Уменьшение числа сквозных макропор ограничивает конвективную составляющую теплопереноса.

Полученное значение 0,55 Вт/(м·К) приближает модифицированный силикатный кирпич к категории энергоэффективных стеновых материалов. При этом достигнутый эффект обеспечивается без применения специально

синтезированных порообразователей и без радикального изменения промышленного автоклавного процесса.

3.7 Прочностные характеристики модифицированного силикатного кирпича

Снижение плотности стенового материала имеет практическую ценность только при сохранении достаточной несущей способности. Результаты испытаний показали, что прочность при сжатии исследованных составов находилась в пределах 16,5–22,3 МПа, что соответствует ориентировочно маркам М150–М200.

Наибольшие значения прочности наблюдались при умеренном содержании стеклопорошка — около 5 %. Это связано с сочетанием эффекта микронаполнения и дополнительного образования С–S–Н-фазы. Тонкодисперсные частицы заполняют межзерновое пространство, увеличивают число реакционных контактов и способствуют формированию плотной цементирующей оболочки вокруг зерен кварца.

При повышении содержания стеклопорошка до 15 % прочность несколько снижалась, однако сохранялась на уровне, приемлемом для стеновых изделий. Вероятными причинами являются уменьшение доли жесткого кварцевого каркаса, увеличение общей пористости, преобладание менее упорядоченной С–S–Н-фазы, подавление формирования части кристаллического тоберморита, изменение соотношения Ca/Si в локальных областях структуры.

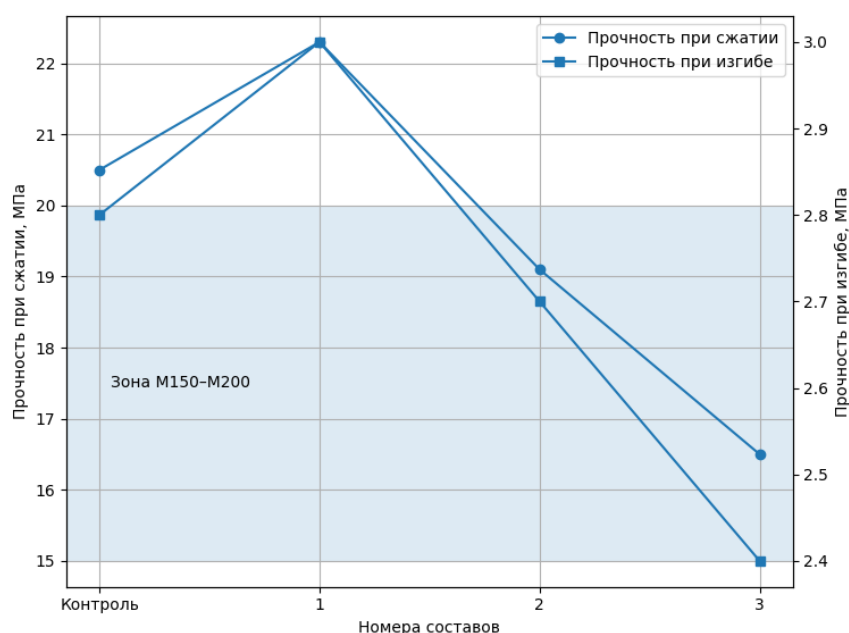


Рисунок 3.3 – Влияние содержания и дисперсности стеклопорошка на прочность силикатного кирпича при сжатии и изгибе

Принципиально важным результатом является то, что снижение теплопроводности до 0,55–0,60 Вт/(м·К) не сопровождается потерей нормативной прочности. Следовательно, стеклопорошок позволяет сформировать рациональный баланс между энергоэффективностью и механической надежностью материала.

3.8 Водопоглощение и морозостойкость

Водопоглощение модифицированных образцов находилось в диапазоне 16–19 %. Некоторое увеличение данного показателя по сравнению с более плотным контрольным материалом связано с ростом объема доступных капиллярных и гелевых пор.

Однако увеличение водопоглощения не сопровождалось снижением морозостойкости. Напротив, для наиболее тонкодисперсного состава морозостойкость повышалась от F25 у контрольного материала до F50.

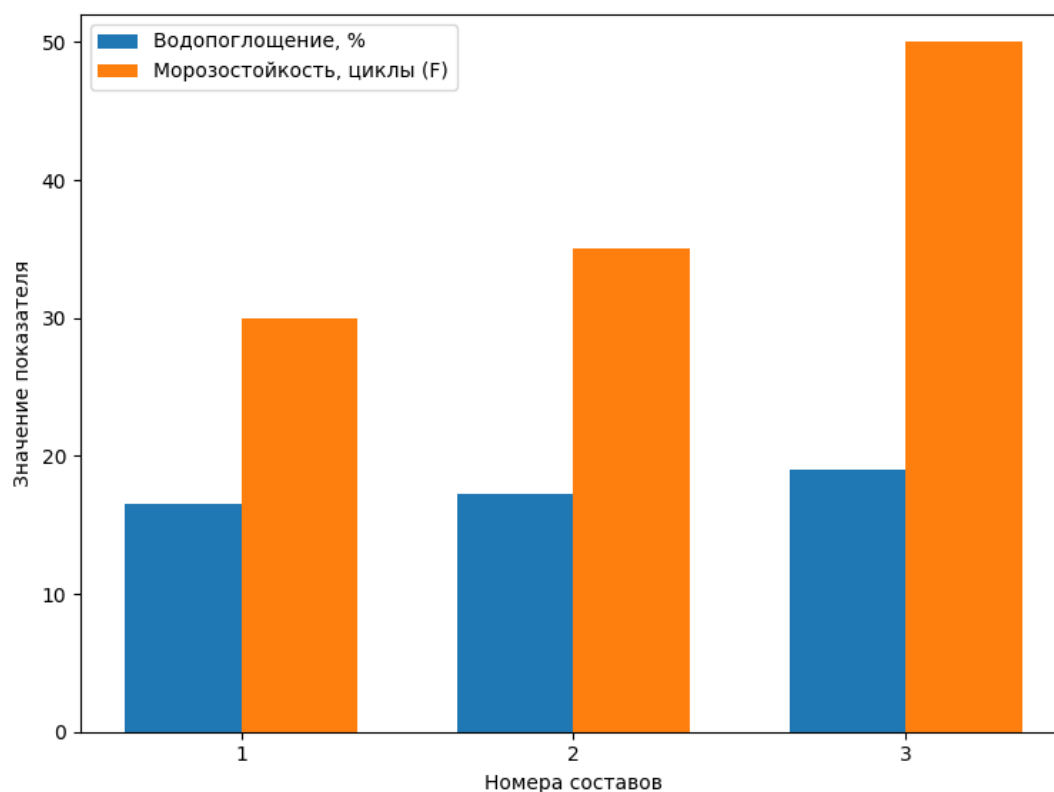


Рисунок 3.4 – Влияние содержания и дисперсности стеклопорошка на водопоглощение и морозостойкость силикатного кирпича

На первый взгляд одновременный рост водопоглощения и морозостойкости может показаться противоречивым. Однако устойчивость материала к циклическому замораживанию определяется не только общим количеством поглощенной воды, но и структурой порового пространства.

В модифицированном материале происходит уменьшение доли крупных дефектных и сквозных пор, более равномерное распределение мелких пор, снижение локальной концентрации влаги, образование резервных объемов для перемещения незамерзшей воды, уменьшение внутренних напряжений при образовании льда.

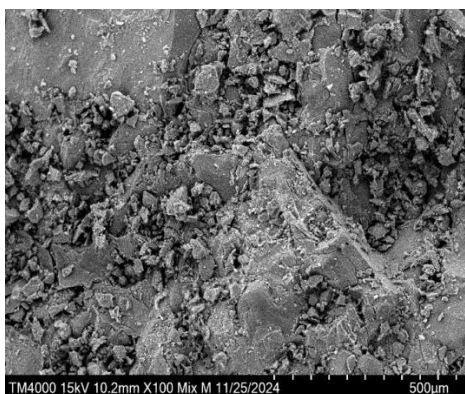
Следовательно, повышение морозостойкости обусловлено оптимизацией топологии пор, а не обязательным снижением общей открытой пористости.

3.9 Исследование микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии

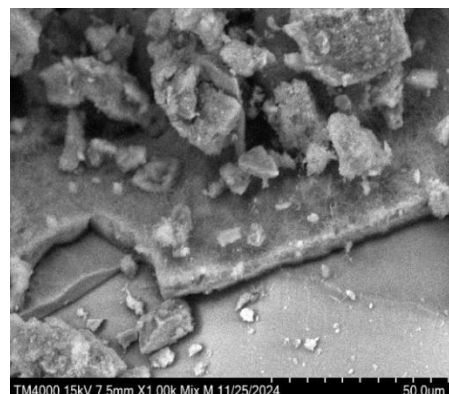
Результаты СЭМ-исследований позволили объяснить установленные изменения физико-механических и теплофизических показателей.

В контрольном составе наблюдаются выраженные зерна кварца, связанные продуктами гидротермального твердения. В межзерновом пространстве формируются пластинчатые и игольчато-пластинчатые новообразования, характерные для тоберморитоподобных гидросиликатов кальция. Структура является сравнительно неоднородной: наряду с плотными контактными зонами присутствуют открытые межзерновые пустоты и локальные дефекты.

В модифицированном образце границы между исходными зернами и гидратной матрицей выражены значительно слабее. Частицы покрыты сплошным слоем продуктов гидротермального взаимодействия. Преобладает более однородная, гелеобразная и полукристаллическая C–S–H-матрица.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Микроструктура автоклавированных образцов:
а — силикатный кирпич с тонкодисперсным стеклопорошком;
б — контрольный силикатный кирпич

В модифицированном составе наблюдается плотное обволакивание зерен продуктами гидротермального синтеза и уменьшение выраженности межзерновых границ. Контрольный материал характеризуется более отчетливыми платинчатыми кристаллическими образованиями. Различие подтверждает переход от преимущественно кристаллического механизма формирования контактов к смешанной структуре с повышенным содержанием аморфной и полукристаллической C–S–H-фазы.

3.10 Рентгенофазовый анализ

Рентгеновская дифрактограмма модифицированного образца характеризуется интенсивными рефlekсами остаточного кварца и менее выраженными пиками тоберморитоподобной фазы. В диапазоне приблизительно $26\text{--}32^\circ 2\theta$ наблюдается повышение диффузного фона, связанного с присутствием аморфных и слабоупорядоченных гидросиликатов кальция.

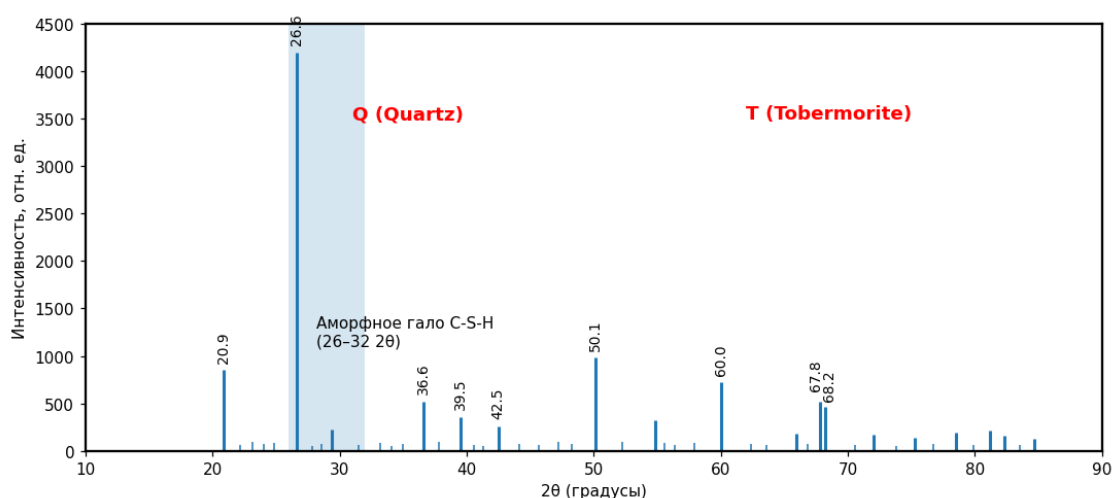


Рисунок 3.6 – Рентгенодифрактограмма автоклавированного силикатного кирпича с тонкодисперсным стеклопорошком

Условные обозначения: Q — кварц, T — тоберморит, выделенная область — аморфное гало C–S–H-фазы.

Преобладание кварца объясняется сохранением части исходного кристаллического песка, выполняющего каркасную функцию. Низкая интенсивность рефlekсов тоберморита и повышенный аморфный фон свидетельствуют о формировании значительного количества слабоупорядоченной C–S–H-фазы.

Полученный фазовый состав связан со щелочным влиянием стеклопорошка. Ионы Na^+ ускоряют растворение аморфного и кристаллического кремнезема, но способны препятствовать

упорядоченной кристаллизации тоберморита. В результате образуется более дисперсная и пространственно развитая гидросиликатная матрица.

При окончательном оформлении монографии следует использовать формулировку «снижение относительной интенсивности рефлексов тоберморита», а не делать вывод о полном отсутствии данной фазы. РФА подтверждает наличие тоберморита в следовых или небольших количествах, одновременно указывая на значительный вклад аморфной составляющей.

3.11 Механизм влияния стеклопорошка на структурообразование

На основании результатов физико-механических испытаний, СЭМ и РФА механизм структурообразования может быть представлен в виде последовательных стадий.

Первая стадия — гидратация извести. После увлажнения смеси происходит образование гидроксида кальция и формируется высокощелочная среда.

Вторая стадия — растворение кремнезема. В автоклавных условиях начинается растворение поверхности кварцевых зерен. Аморфный кремнезем стеклопорошка растворяется быстрее, чем кристаллический кварц. Ионы Na^+ дополнительно повышают щелочность жидкой фазы и ускоряют переход кремнезема в раствор.

Третья стадия — образование первичной C–S–H-фазы. Растворенные соединения кальция и кремния взаимодействуют с образованием слабоупорядоченных гидросиликатов кальция. Тонкодисперсные частицы стекла служат реакционными центрами и микронаполнителями.

Четвертая стадия — формирование смешанной гидратной матрицы. В контрольном составе часть C–S–H-фазы преобразуется в более упорядоченные тоберморитовые образования. В присутствии стеклопорошка щелочные ионы частично подавляют данный процесс, поэтому сохраняется повышенная доля аморфной и полукристаллической C–S–H-фазы.

Пятая стадия — перестройка порового пространства. Гелеобразные продукты заполняют межзерновые области, но одновременно формируют развитую систему мелких гелевых и капиллярных пор. Уменьшается количество крупных дефектов и сквозных каналов.

Шестая стадия — формирование эксплуатационных свойств. Такая структура обеспечивает, снижение средней плотности, уменьшение коэффициента теплопроводности, сохранение нормативной прочности, умеренное увеличение водопоглощения, повышение морозостойкости за счет более равномерной структуры пор.

Концептуальная модель данного процесса представлена на рис. 3.7 и хорошо согласуется с результатами фазового и микроструктурного анализа.

Полученные результаты подтверждают, что варьирование дисперсности стеклопорошка из отходов стекла позволяет целенаправленно управлять плотностью, теплопроводностью и прочностными характеристиками силикатного кирпича без изменения базовой промышленной технологии производства.

Оптимальным является использование 10–12 % стеклопорошка с $d_{50} \approx 20\text{--}40$ мкм, при котором достигается сочетание снижения теплопроводности до 0,55–0,60 Вт/(м·К), сохранения прочности на уровне М150–М175 и повышения морозостойкости до F35–F50. Данный подход полностью соответствует современным тенденциям развития энергоэффективных стеновых материалов и устойчивого строительства

Представленная на рисунке 3.7 концептуальная схема иллюстрирует влияние стеклопорошка как источника реакционноспособного SiO_2 и щелочных ионов Na^+ на кинетику гидротермальных реакций. Щелочное воздействие способствует интенсификации растворения кремнезёма и формированию аморфной и полукристаллической C–S–H-фазы при одновременном подавлении кристаллизации тоберморита, что приводит к уплотнению с образованием микроструктуры и снижению теплопроводности материала.

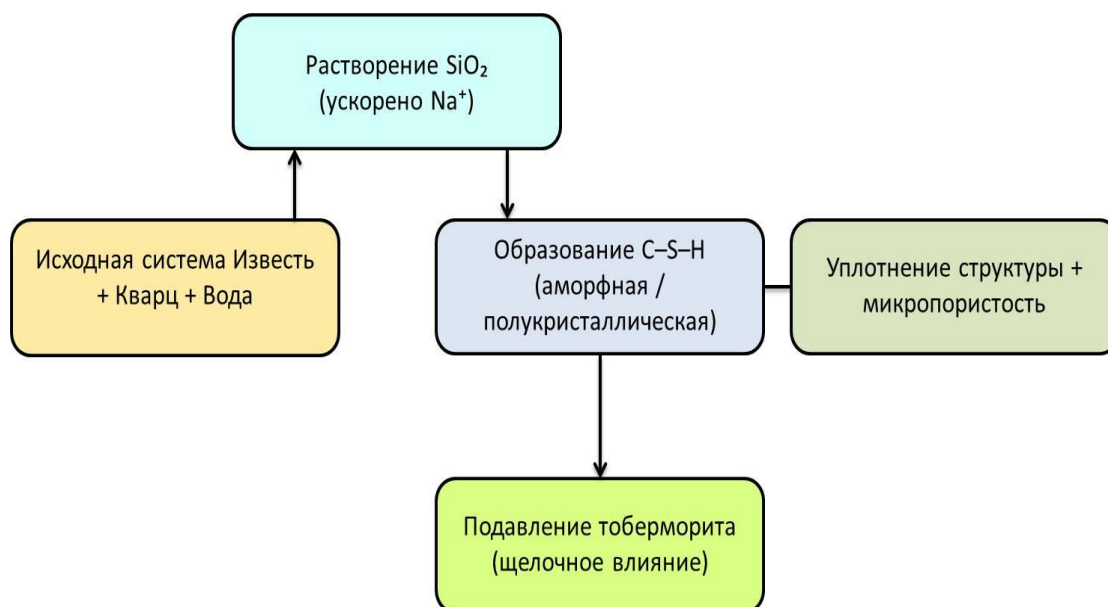


Рисунок 3.7 – Концептуальная модель влияния тонкодисперсного стеклопорошка на гидротермальное структурообразование силикатного кирпича

3.12 Комплексная взаимосвязь «состав — структура — свойства»

Полученные результаты позволяют сформулировать основную закономерность: увеличение содержания и тонкости помола стеклопорошка повышает активность кремнеземной составляющей и изменяет соотношение между аморфной С–S–Н-фазой и кристаллическими тоберморитовыми соединениями, что приводит к перестройке порового пространства, снижению плотности и теплопроводности при сохранении приемлемой прочности.

Умеренное содержание стеклопорошка около 5 % обеспечивает максимальный прочностной эффект за счет микронаполнения и дополнительного образования гидросиликатов кальция.

Более высокое содержание — 10–15 % — обеспечивает наиболее выраженное снижение плотности и теплопроводности. При этом небольшое уменьшение прочности компенсируется существенным улучшением теплозащитных характеристик.

С учетом совокупности свойств рациональным следует считать содержание 10–12 % стеклопорошка с d_{50} около 20–40 мкм. При таких параметрах может быть обеспечено снижение коэффициента теплопроводности до 0,55–0,60 Вт/(м·К), сохранение прочности на уровне М150–М175, морозостойкость ориентировочно F35–F50, приемлемое водопоглощение, возможность применения существующего промышленного режима формования и автоклавирования.

Следует подчеркнуть, что точное оптимальное значение должно устанавливаться с учетом требований к назначению кирпича: для несущих конструкций приоритетом является прочность, а для ненесущих и самонесущих ограждающих конструкций — минимальная теплопроводность при нормативной механической надежности.

Выводы по главе 3

1. Установлено, что тонкодисперсный стеклопорошок из отходов листового стекла выполняет в автоклавной силикатной системе комплексную функцию активного источника аморфного кремнезема, микронаполнителя и источника щелочных ионов Na^+ .

2. Увеличение содержания стеклопорошка от 5 до 15 % при одновременном уменьшении медианного размера частиц с 30–50 до 10–20 мкм приводит к снижению средней плотности силикатного материала приблизительно с 1780 до 1580 кг/м³.

3. Коэффициент теплопроводности снижается с 0,78 до 0,55 Вт/(м·К), то есть примерно на 30 %. Более значительное снижение теплопроводности по сравнению с плотностью подтверждает качественную перестройку порового пространства.

4. Прочность при сжатии модифицированных образцов находится в диапазоне 16,5–22,3 МПа и соответствует маркам М150–М200. Максимальный прочностной эффект достигается при умеренном содержании стеклопорошка.

5. Водопоглощение составляет 16–19 %, при этом морозостойкость повышается от F25 до F50 вследствие уменьшения количества крупных дефектных пор и формирования более равномерной мелкопористой структуры.

6. СЭМ-анализ показал формирование в модифицированных образцах плотной и однородной гидросиликатной матрицы, обволакивающей зерна исходных компонентов и снижающей выраженность межзерновых границ.

7. Рентгенофазовый анализ подтвердил наличие остаточного кварца, небольшого количества тоберморита и значительного вклада аморфной и полукристаллической C–S–H-фазы.

8. Установлено, что щелочные ионы Na^+ стеклопорошка ускоряют растворение кремнезема, но одновременно могут подавлять упорядоченную кристаллизацию тоберморита, стабилизируя слабокристаллические гидросиликаты кальция.

9. Рациональным является использование 10–12 % стеклопорошка с d_{50} около 20–40 мкм, обеспечивающее сбалансированное сочетание пониженной теплопроводности, нормативной прочности и повышенной морозостойкости.

10. Полученные результаты формируют научную основу производства энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя без принципиального изменения существующей промышленной технологии.

ГЛАВА 4. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕКЛОПОРОШКА И ЗОЛЫ-УНОСА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

4.1 Научная концепция комплексного модифицирования силикатной массы

Результаты исследований, изложенные в Главе 3, показали, что тонкодисперсный стеклопорошок является эффективным инструментом управления структурой и теплофизическими свойствами силикатного кирпича автоклавного твердения. Применение переработанного стекла позволяет повысить активность кремнеземной составляющей, изменить соотношение между слабоупорядоченными гидросиликатами кальция и кристаллическими тоберморитовыми фазами, снизить среднюю плотность и коэффициент теплопроводности изделий при сохранении нормативной прочности.

Вместе с тем дальнейшее повышение энергоэффективности силикатного кирпича требует комплексного регулирования не только кремнеземной составляющей, но и поровой структуры материала. В связи с этим следующим этапом исследований стало совместное применение тонкодисперсного стеклопорошка и золы-уноса тепловых электростанций.

Выбор данной комбинации обусловлен различием и взаимным дополнением функций используемых техногенных компонентов. Стеклопорошок является преимущественно аморфным кремнеземсодержащим материалом и источником щелочных оксидов, способных активизировать процессы растворения кремнезема в гидротермальных условиях. Зола-унос представляет собой полидисперсное алюмосиликатное сырье, содержащее стекловидную фазу, сферические микрочастицы и пористые агрегаты, способные выполнять функции активной минеральной добавки, микронаполнителя и структурорегулирующего компонента.

В традиционной системе силикатного кирпича прочностная матрица формируется преимущественно в результате взаимодействия гидроксида кальция с кварцевым песком: $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$.

При совместном введении стеклопорошка и золы-уноса система усложняется и приобретает следующий вид: $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-H}_2\text{O}$.

В такой многокомпонентной системе наряду с традиционными гидросиликатами кальция C-S-H создаются предпосылки для образования алюмосодержащих гидратных соединений типа C-(A)-S-H . Частичное изоморфное замещение кремния алюминием в структуре гидросиликатов может изменять морфологию, степень полимеризации и устойчивость цементирующей матрицы.

Научная гипотеза исследования заключалась в том, что совместное использование стеклопорошка и золы-уноса позволит реализовать синергетический эффект:

- стеклопорошок ускоряет растворение кремнеземных компонентов и образование первичных С–S–Н-фаз;
- щелочные оксиды стекла активируют аморфную алюмосиликатную составляющую золы;
- зола-унос формирует дополнительное количество С–(А)–S–Н-соединений;
- полидисперсные частицы золы изменяют упаковку сырьевой смеси;
- пористые агрегаты золы способствуют снижению средней плотности;
- мелкодисперсные сферические частицы заполняют межзерновое пространство;
- формируется мелкопористая структура с пониженной теплопроводностью;
- при рациональном содержании добавок сохраняется достаточная механическая прочность.

4.2 Характеристика золы-уноса как активного алюмосиликатного компонента

В качестве второго техногенного компонента использовалась зола-унос Экибастузской ТЭЦ-2. Данный вид отхода образуется при высокотемпературном сжигании угля и улавливается из потока дымовых газов электрофильтрами.

Зола-унос представляет собой сложную полидисперсную систему, включающую аморфные стекловидные частицы, кристаллические алюмосиликаты, сферические микрочастицы и пористые агрегаты неправильной формы. Такая неоднородность обусловлена различиями в минеральном составе исходного угля, температуре горения, скорости охлаждения расплава и условиях улавливания частиц.

В технологии автоклавного силикатного кирпича зола-унос может выполнять несколько функций:

1. активного алюмосиликатного компонента, участвующего в образовании гидратных соединений;
2. микронаполнителя, заполняющего межзерновое пространство между частицами песка и извести;
3. структурорегулирующей добавки, изменяющей плотность упаковки и характер порового пространства;
4. облегчающего компонента, способствующего снижению средней плотности материала;

5. источника аморфных SiO_2 и Al_2O_3 , способных вступать в гидротермальные реакции.

Таблица 4.1 – Гранулометрические характеристики золы-уноса Экибастузской ГРЭС-2

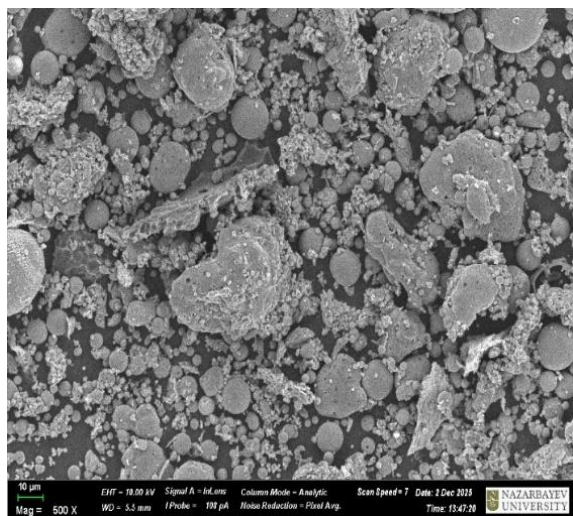
Материал	Dv(10), мкм	Dv(50), мкм	Dv(90), мкм
Зола-унос Экибастузской ГРЭС-2	7,83	70,4	218

Полученные значения свидетельствуют о широком распределении частиц по размерам. При этом около 10 % частиц имеют размер менее 7,83 мкм, медианный размер составляет 70,4 мкм, а наиболее крупная часть распределения достигает 218 мкм.

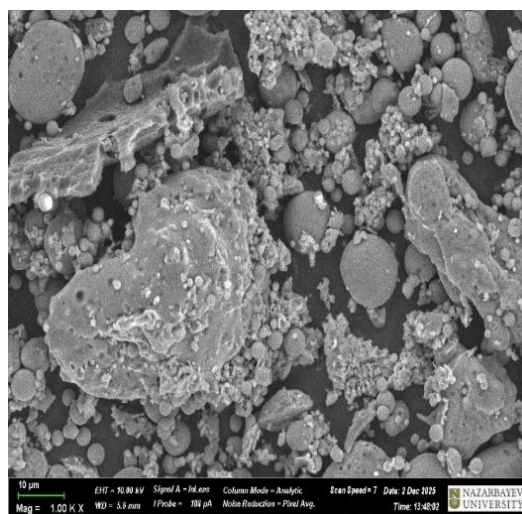
Полидисперсность золы имеет важное технологическое значение. Мелкие частицы способны заполнять пустоты между более крупными зернами силикатной массы, тогда как пористые агрегаты и микросферы формируют локальные участки пониженной плотности. В результате создается сложная иерархическая структура, сочетающая уплотненные контактные зоны и равномерно распределенные мелкие поры.

4.3 Микроструктура и элементный состав золы-уноса

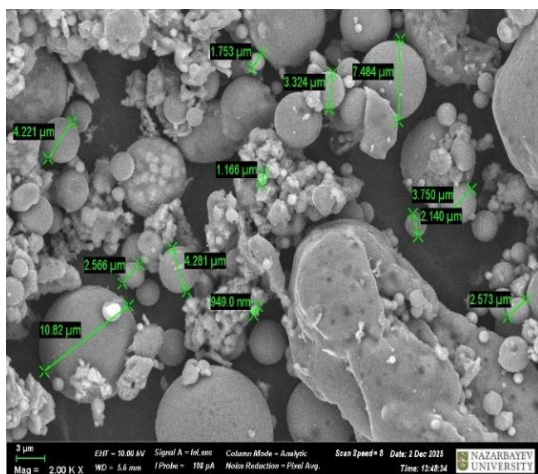
Морфологию золы-уноса исследовали методом сканирующей электронной микроскопии при различных увеличениях. Дополнительно выполнялся энергодисперсионный анализ для установления элементного состава частиц.



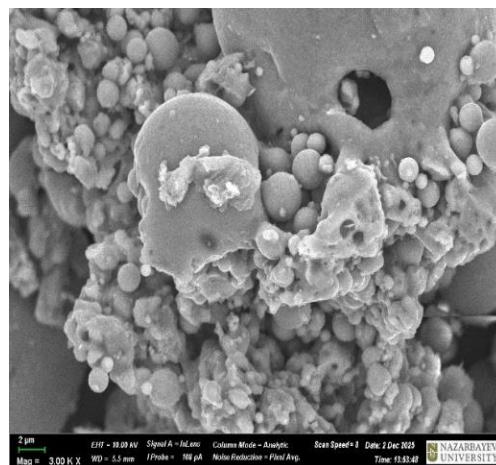
а)



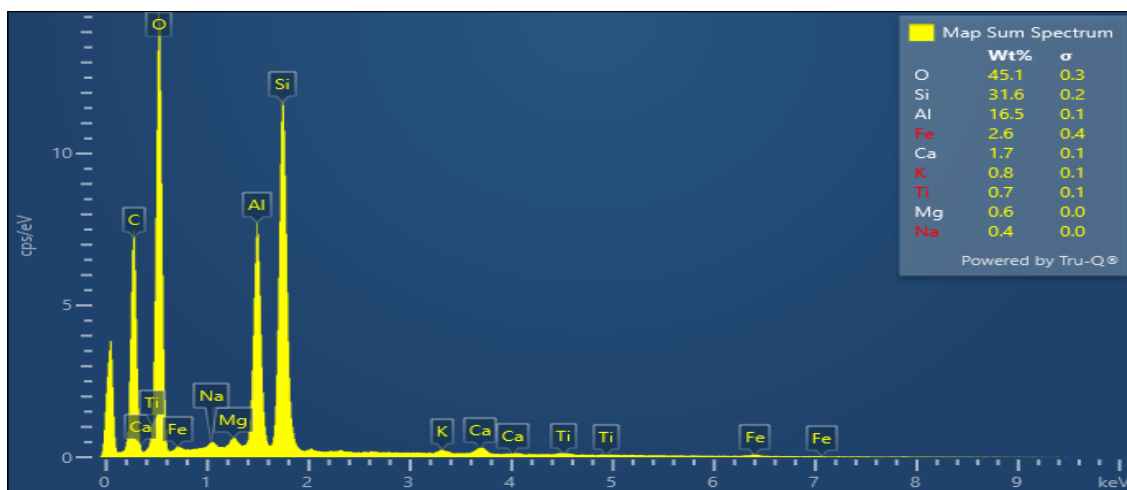
б)



с)



д)



е)

Рисунок 4.1 – СЭМ-микрофотографии золы-уноса Экибастузской ГРЭС-2 при различных увеличениях и EDS-спектр а–д — морфология частиц при различных увеличениях, е — EDS-спектр элементного состава.

Микроструктура золы характеризуется сочетанием сферических стекловидных частиц, мелких микросфер и пористых агрегатов неправильной формы. Сферические частицы обладают относительно гладкой поверхностью, что свидетельствует об их образовании из расплавленной минеральной части угля при быстром охлаждении. Пористые фрагменты представлены частично оплавленными агрегатами, содержащими развитые дефектные участки и внутренние пустоты.

Наиболее важное значение имеют мелкие частицы размером менее 1–2 мкм, распределенные между крупными микросферами. Они способны

выполнять роль микронаполнителя, увеличивать площадь реакционного контакта и участвовать в образовании вторичных гидратных соединений.

EDS-спектр показывает преобладание кислорода, кремния и алюминия. В меньших количествах присутствуют кальций, железо, магний, натрий и калий. Такое сочетание элементов подтверждает алюмосиликатную природу золы и возможность ее участия в формировании C–(A)–S–H-фаз.

Морфология и элементный состав золы-уноса являются благоприятными для автоклавного синтеза по следующим причинам аморфный SiO_2 служит дополнительным источником кремнезема, Al_2O_3 способен частично внедряться в структуру гидросиликатов кальция, CaO участвует в формировании кальцийсодержащих гидратных фаз, щелочные оксиды повышают растворимость стекловидной составляющей, сферические частицы улучшают подвижность и упаковку сырьевой смеси, пористые агрегаты способствуют снижению средней плотности.

4.4 Фазовый состав золы-уноса

Минералогический состав золы-уноса определяли методом рентгенофазового анализа. Исследование показало, что значительная часть материала представлена аморфной стекловидной фазой, которая проявляется на дифрактограммах в виде широкого диффузного гало.

Наряду с аморфной составляющей в отдельных пробах идентифицированы кристаллические фазы, приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Фазовый состав проб золы-уноса Экибастузской ГРЭС-2

№ пробы	Идентифицированные фазы	Химическая формула
1	Аморфная фаза	—
2	Аморфная фаза	—
3	Содалит	$\text{Na}_8 (\text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{24}) (\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Алюмосиликатная фаза	$\text{Al}_2 (\text{Al}_{2,556}\text{Si}_{1,444})\text{O}_{9,722}$
	Муллит	алюмосиликатная фаза
	Трабзонит	$\text{Ca}_4 ((\text{SiO}_3)_3 (\text{OH}))(\text{OH})$
4	Магнезиоферрит	$\text{MgFe}_2 \text{O}_4$
	Кварц	SiO_2
	Алюминат кальция	$\text{Ca}_9 (\text{Al}_2 \text{O}_6)_3$

Доминирование аморфной составляющей является важным фактором потенциальной реакционной способности золы. В отличие от устойчивых кристаллических минералов аморфная стекловидная фаза обладает повышенной свободной энергией и легче растворяется в щелочной среде автоклава.

Присутствие муллита подтверждает алюмосиликатную природу золы, однако данная фаза обладает сравнительно высокой кристаллической устойчивостью и может участвовать в гидротермальных реакциях лишь частично. Кварц и магнезиоферрит преимущественно сохраняются в качестве инертных или малоактивных включений.

Фазовый состав золы обеспечивает три направления ее влияния на силикатную систему аморфная Si–Al-фаза участвует в синтезе C–(A)–S–H, кристаллические частицы выполняют функцию минерального каркаса и микронаполнителя, щелочные и кальцийсодержащие соединения дополнительно активируют гидротермальные реакции.

4.5 Разработка составов силикатной массы со стеклопорошком и золой-уноса

При разработке экспериментальной программы в качестве контрольного состава использовалась промышленная силикатная масса АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов», состоящая из кварцевого песка и воздушной извести.

Стеклопорошок получали путем механического измельчения отходов стекла. Для исследования использовали тонкодисперсный порошок с характерным размером частиц 10–20 мкм.

Золу-унос вводили в возрастающем количестве для оценки ее влияния на плотность, теплопроводность, прочность и долговечность силикатного кирпича.

Таблица 4.3 – Составы силикатного кирпича с использованием стеклопорошка и золы-уноса

№ состава	Силикатная масса, мас. %	Стеклопорошок 10–20 мкм, мас. %	Зола-унос, мас. %
Контроль	100	0	0
1	85	5	5
2	80	10	10
3	75	10	15
4	70	10	20

Выбранная последовательность составов позволила оценить несколько уровней комплексного модифицирования.

Состав №1 характеризует умеренное совместное введение двух добавок. Состав №2 предусматривает равное содержание стеклопорошка и золы-уноса. В составах №3 и №4 содержание стеклопорошка сохранялось на уровне 10 %, а количество золы последовательно увеличивалось до 15 и 20 %.

Такое планирование позволило отдельно проследить эффект повышения доли золы при постоянном содержании наиболее активного стеклосодержащего компонента.

4.6 Приготовление, формование и автоклавное твердение образцов

Исходные компоненты дозировали по массе и подвергали сухому смешиванию до получения однородной композиции. После этого вводили воду в количестве 10–12 % от массы сухой смеси.

Увлажнение обеспечивало формовочную консистенцию, необходимую для полусухого прессования. После введения воды смесь дополнительно перемешивали для равномерного распределения влаги, стеклопорошка и золы-уноса.

Формование осуществляли при удельном давлении 20 МПа. Для определения прочности при сжатии и теплофизических характеристик использовали образцы цилиндрической или кубической формы, для испытаний на изгиб — призмы размером $40 \times 40 \times 160$ мм.

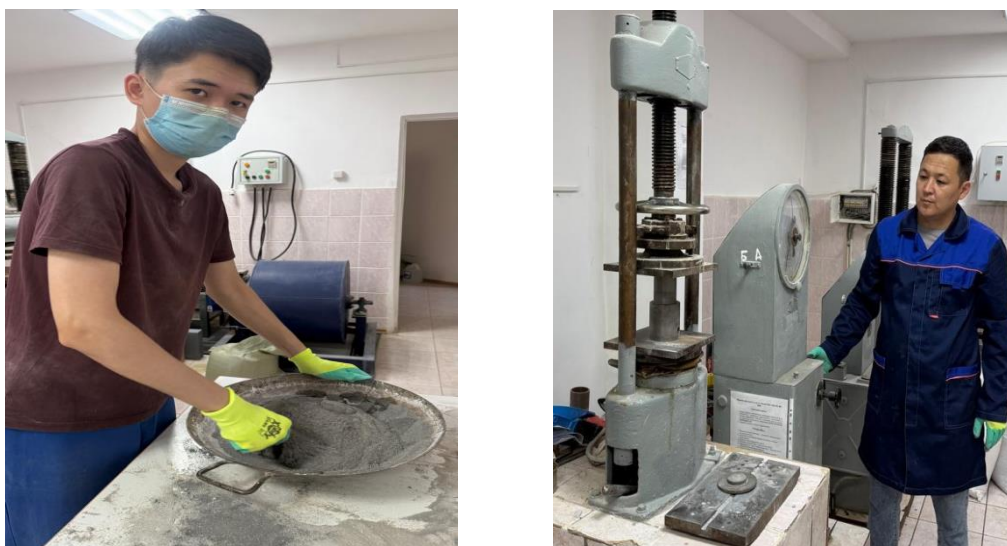


Рисунок 4.2 – Подготовка сырьевой смеси и формование образцов силикатного кирпича со стеклопорошком и золой-уноса

Использование стандартной схемы полусухого прессования подтверждает технологическую совместимость разработанных составов с действующим производством силикатного кирпича. Стеклопорошок и зола-унос вводятся в общую массу на стадии дозирования и не требуют отдельного сложного технологического оборудования, за исключением подготовки и хранения вторичного сырья.

Автоклавное твердение осуществляли по режиму, приближенному к заводским условиям: повышение температуры и давления насыщенного пара, достижение температуры порядка 174–190 °С, давление 0,8–1,2 МПа,

изотермическая выдержка 6–8 часов, контролируемое снижение давления и температуры.

4.7 Влияние комплексного модифицирования на плотность и теплопроводность

Результаты исследований показали закономерное снижение средней плотности по мере увеличения содержания стеклопорошка и золы-уноса. Контрольный силикатный кирпич характеризовался средней плотностью 1910–1950 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 0,88–0,91 Вт/(м·К). При введении 5 % стеклопорошка и 5 % золы-уноса средняя плотность снизилась до 1815–1820 кг/м³, а теплопроводность — до 0,69–0,70 Вт/(м·К). Для состава №2, содержащего по 10 % стеклопорошка и золы-уноса, средняя плотность составила 1760–1775 кг/м³, а коэффициент теплопроводности — 0,65–0,67 Вт/(м·К). Состав №3 с 10 % стеклопорошка и 15 % золы характеризовался плотностью 1720–1730 кг/м³ и теплопроводностью 0,61–0,64 Вт/(м·К).

Наиболее низкие показатели получены для состава №4 с 10 % стеклопорошка и 20 % золы-уноса: средняя плотность снизилась до 1650–1700 кг/м³, а теплопроводность — до 0,52–0,54 Вт/(м·К).

Согласно сформулированной научной гипотезе, совместное использование стеклопорошка и золы-уноса должно обеспечивать снижение средней плотности силикатного кирпича за счет формирования более развитой мелкопористой структуры и одновременного уменьшения коэффициента теплопроводности вследствие повышения термического сопротивления материала. Проверка данного предположения осуществлялась путем определения основных теплофизических характеристик экспериментальных образцов после завершения автоклавного твердения. Полученные результаты позволяют количественно оценить эффективность комплексного модифицирования силикатной массы и установить взаимосвязь между составом композиции, плотностью и теплопроводностью изделий. Результаты исследований представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Влияние состава на среднюю плотность и коэффициент теплопроводности

Состав	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Контроль	1910–1950	0,88–0,91
№1	1815–1820	0,69–0,70
№2	1760–1775	0,65–0,67
№3	1720–1730	0,61–0,64
№4	1650–1700	0,52–0,54

Одной из основных задач настоящего исследования являлось установление количественной взаимосвязи между изменением средней плотности силикатного кирпича и его теплофизическими характеристиками при комплексном модифицировании стеклопорошком и золой-уноса. Для выявления данной закономерности результаты экспериментальных исследований были представлены в виде зависимости коэффициента теплопроводности от средней плотности. Такой способ представления позволяет не только наглядно оценить влияние разработанных составов на теплоизоляционные свойства материала, но и установить общую тенденцию структурных изменений, происходящих в процессе гидротермального твердения. Графическая зависимость представлена на рисунке 4.2.

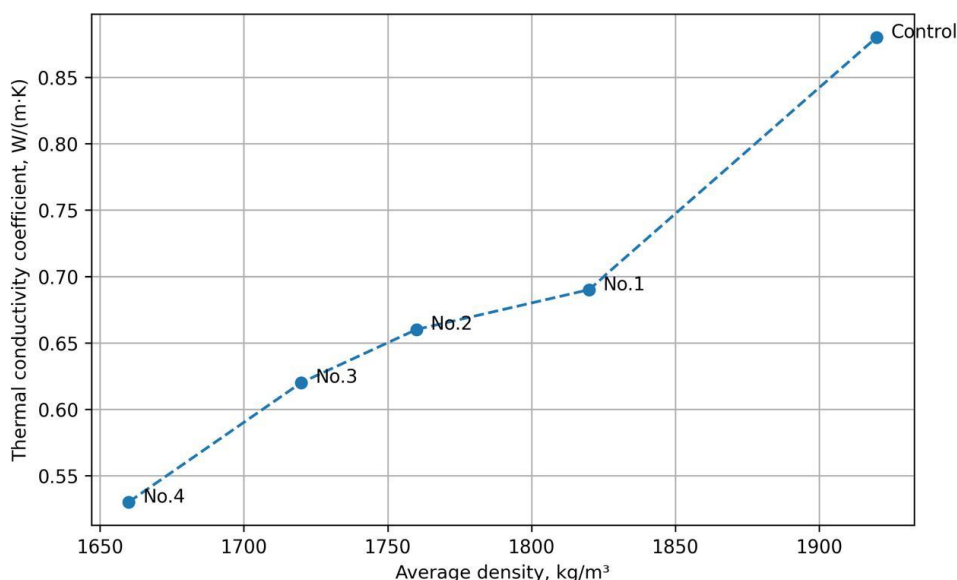


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности силикатного кирпича при совместном введении стеклопорошка и золы-уноса

График демонстрирует практически монотонную зависимость: с уменьшением средней плотности закономерно снижается коэффициент теплопроводности. Вместе с тем уменьшение λ выражено сильнее, чем снижение плотности, что свидетельствует о качественной перестройке порового пространства.

Снижение теплопроводности обусловлено совокупностью факторов уменьшением объемной доли твердой фазы, введением пористых частиц золы, формированием гелевых и капиллярных пор, сокращением непрерывных путей теплопереноса через твердую матрицу, изменением морфологии С–S–Н- и С–(А)–S–Н-фаз, более равномерным распределением пор по объему материала.

В составе №4 коэффициент теплопроводности снизился приблизительно на 40 % по отношению к контрольному кирпичу. Однако выбор рационального состава не может основываться только на минимальной теплопроводности, поскольку необходимо учитывать прочность, водопоглощение и морозостойкость.

4.8 Прочностные характеристики и выбор рациональных составов

Контрольный силикатный кирпич обладал прочностью при сжатии 18–19 МПа и прочностью при изгибе 3,8–3,9 МПа (рис. 4.4)

При введении стеклопорошка и золы наблюдалось умеренное снижение прочностных характеристик. Оно связано с уменьшением доли плотной заводской силикатной массы и увеличением пористости материала.

Тем не менее изменения носили плавный и управляемый характер. Составы №2 и №3 сохраняли прочность при сжатии на уровне не ниже 17,5 МПа, что позволяет рассматривать их как наиболее рациональные для энергоэффективных стеновых изделий.

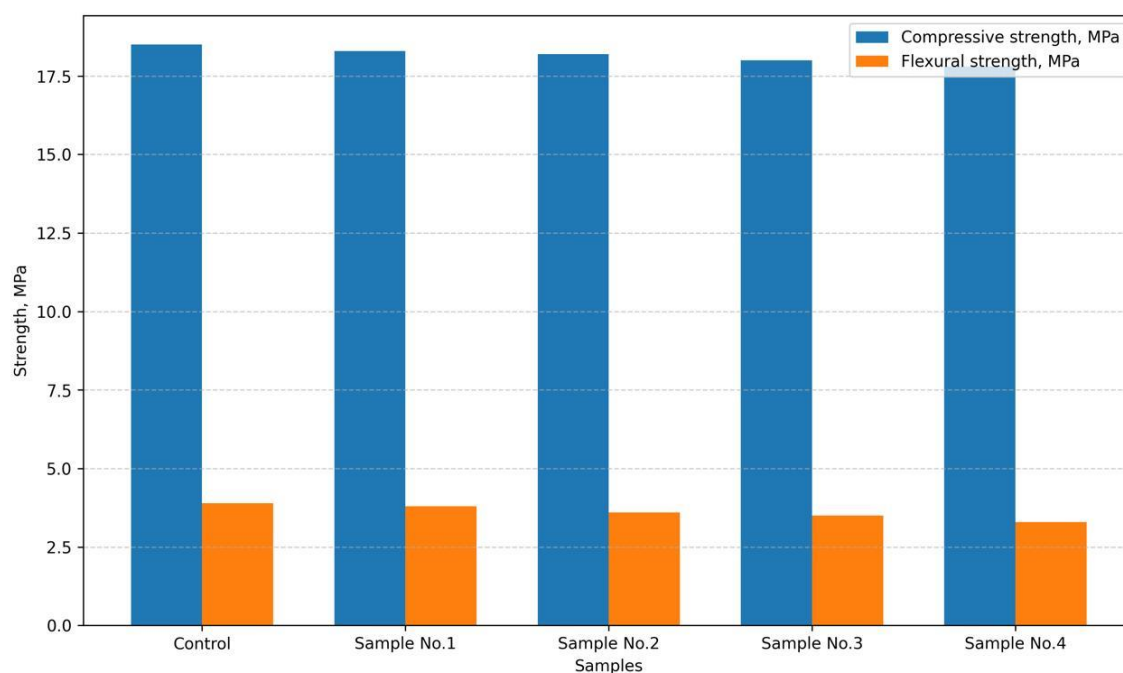


Рисунок 4.4 – Прочность при сжатии и изгибе силикатного кирпича в зависимости от содержания стеклопорошка и золы-уноса

Показатели подтверждают, что снижение плотности и теплопроводности не сопровождается пропорциональным падением прочности. Это объясняется формированием дополнительной гидратной

матрицы, включающей C–S–H- и C–(A)–S–H-фазы, а также эффектом микронаполнения мелкодисперсными частицами.

При чрезмерном увеличении содержания золы до 20 % прочность снижается более заметно. Возможными причинами являются недостаток доступного кальциевого компонента для полного связывания золы, увеличение количества непрореагировавших частиц, рост общей пористости, ослабление традиционного кварцево-силикатного каркаса, неоднородность структуры при высокой доле полидисперсной добавки.

Таким образом, состав №4 обеспечивает минимальную теплопроводность, но составы №2 и №3 характеризуются более сбалансированным сочетанием теплозащитных и прочностных свойств.

4.9 Водопоглощение и морозостойкость

Введение стеклопорошка и золы-уноса приводит к изменению водопоглощения вследствие развития поровой структуры. По мере увеличения содержания техногенных компонентов водопоглощение повышается, что закономерно для материала с пониженной средней плотностью.

Для рациональных составов показатель находился ориентировочно в диапазоне 18,3–20,5 %, оставаясь допустимым для силикатных стеновых изделий соответствующего назначения.

Морозостойкость составов №2 и №3 составляла приблизительно F27–F35. Данный уровень позволяет применять материал в ограждающих конструкциях при условии соблюдения требований к защите от длительного водонасыщения (рис. 4.5)

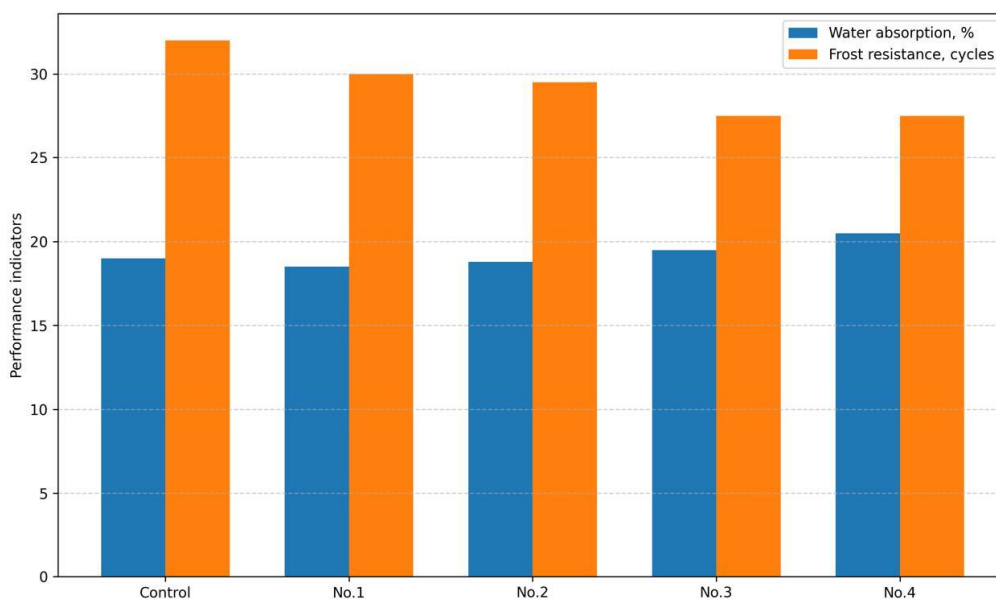


Рисунок 4.5 – Водопоглощение и морозостойкость силикатного кирпича, модифицированного стеклопорошком и золой-уноса

Эксплуатационная стойкость определяется не только общей пористостью, но и распределением пор по размерам. Мелкие равномерно распределенные поры снижают локальные напряжения при замораживании воды, тогда как крупные открытые дефекты оказывают более негативное влияние на долговечность.

При увеличении содержания золы выше рационального уровня возрастает риск формирования взаимосвязанных капиллярных пор. Поэтому состав №4, несмотря на минимальную теплопроводность, требует дополнительного контроля морозостойкости и эксплуатационной влажности.

4.10 Механизм совместного действия стеклопорошка и золы-уноса

Обобщение результатов позволяет предложить следующий механизм формирования структуры.

Первая стадия — активация системы

После увлажнения известь гидратируется с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Формируется высокощелочная среда, дополнительно усиливаемая ионами Na^+ , поступающими из стеклопорошка.

Вторая стадия — растворение аморфных компонентов

Аморфный SiO_2 стекла и стекловидная алюмосиликатная составляющая золы начинают растворяться быстрее, чем кристаллический кварц.

Третья стадия — образование C–S–H. Растворенный кремнезем взаимодействует с ионами кальция с образованием первичных слабоупорядоченных гидросиликатов кальция.

Четвертая стадия — образование C–(A)–S–H. Растворенный алюминий из золы частично включается в структуру гидросиликатов. Формируется смешанная кальций-алюмосиликатная матрица. Пятая стадия — структурная упаковка. Сферические частицы золы и тонкие частицы стеклопорошка заполняют межзерновые пространства. Пористые агрегаты золы формируют локальные области пониженной плотности.

Шестая стадия — формирование мелкопористой структуры. Гидратные продукты связывают исходные зерна, формируя пространственный каркас с системой гелевых, капиллярных и мелких воздушных пор. Седьмая стадия — формирование эксплуатационных свойств

Мелкопористая смешанная матрица обеспечивает снижение средней плотности, уменьшение теплопроводности, сохранение нормативной прочности, приемлемое водопоглощение, достаточную морозостойкость рациональных составов.

Проведенные исследования физико-механических, теплофизических, микроструктурных и рентгенофазовых характеристик силикатного кирпича показали, что совместное использование стеклопорошка и золы-уноса оказывает комплексное влияние на процессы гидротермального структурообразования. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что улучшение эксплуатационных свойств материала обусловлено не отдельным воздействием каждого компонента, а их взаимным синергетическим эффектом, проявляющимся на всех стадиях формирования структуры — от растворения активных кремнезем- и алюмосиликатсодержащих компонентов до образования гидратных новообразований и формирования оптимизированного порового пространства.

Стеклопорошок, благодаря высокому содержанию аморфного диоксида кремния и щелочных оксидов, интенсифицирует процессы растворения кремнезема и образования гидросиликатов кальция. Одновременно аморфная алюмосиликатная составляющая золы-уноса вовлекается в гидротермальные реакции, способствуя формированию смешанной кальций-кремний-алюмосиликатной гидратной матрицы. Наряду с этим сферические частицы золы и тонкодисперсные частицы стеклопорошка изменяют упаковку зерен силикатной массы, обеспечивая образование более равномерной мелкопористой структуры, что в конечном итоге приводит к снижению средней плотности и коэффициента теплопроводности при сохранении требуемой прочности материала.

Для наглядного представления выявленных закономерностей и обобщения экспериментальных результатов разработана концептуальная схема, отражающая последовательность процессов, происходящих при совместном использовании стеклопорошка и золы-уноса в технологии силикатного кирпича, а также механизм формирования его структуры и эксплуатационных свойств (рис. 4.6).

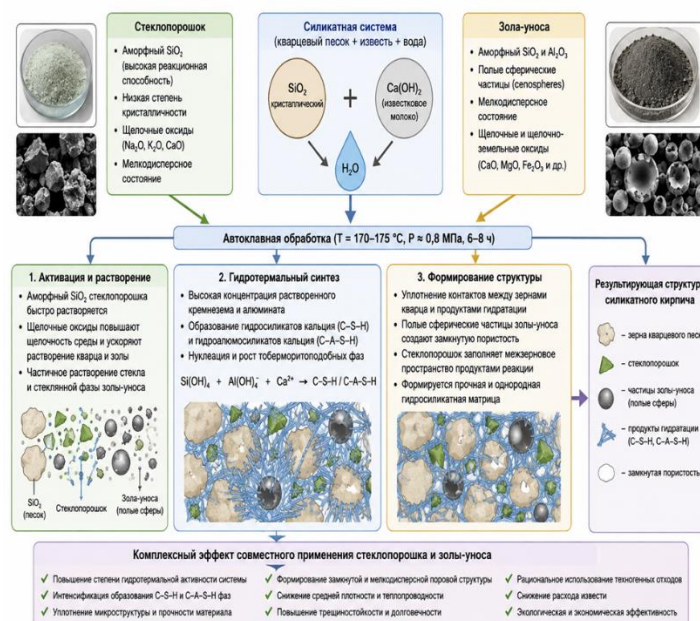


Рисунок 4.6 – Концептуальная схема совместного влияния стеклопорошка и золы-уноса на структурообразование силикатного кирпича

4.11 Обоснование рационального состава

Выбор рационального состава должен основываться на комплексной оценке всех свойств, а не на одном минимальном значении теплопроводности.

Состав №1 обеспечивает заметное снижение теплопроводности, однако потенциал вторичного сырья реализуется не полностью.

Состав №4 характеризуется минимальными значениями плотности и теплопроводности, но повышенное содержание золы может привести к снижению прочности, росту водопоглощения и ухудшению стабильности свойств.

Наиболее рациональными являются составы №2 и №3:

- стеклопорошок — 10 %;
- зола-унос — 10–15 %;
- силикатная масса — 75–80 %.

Для данных составов обеспечиваются:

- средняя плотность 1720–1775 кг/м³;
- коэффициент теплопроводности 0,61–0,67 Вт/(м·К);
- снижение теплопроводности приблизительно на 25–30 %;
- прочность при сжатии не ниже 17,5 МПа;
- морозостойкость F27–F35;
- приемлемое водопоглощение;

- возможность использования существующей технологии прессования и автоклавирования.

Для ненесущих ограждающих элементов, где приоритетом является минимальная теплопроводность, может дополнительно рассматриваться состав №4 при условии подтверждения долговечности и влагостойкости в расширенных испытаниях.

Выводы по главе 4

1. Научно обоснована возможность совместного использования тонкодисперсного стеклопорошка и золы-уноса Экибастузской ГРЭС-2 в технологии автоклавного силикатного кирпича.

2. Установлено, что стеклопорошок выступает источником активного аморфного кремнезема и щелочных ионов, а зола-унос является полидисперсным алюмосиликатным компонентом, способствующим образованию C–(A)–S–H-фаз и развитию мелкопористой структуры.

3. СЭМ-исследование золы выявило сферические стекловидные частицы, мелкие микросферы и пористые агрегаты неправильной формы, способные выполнять функции микронаполнителя и структурорегулирующей добавки.

4. РФА показал наличие значительной аморфной составляющей, а также содалита, муллита, кварца, магнезиоферрита и отдельных кальций-алюмосиликатных фаз.

5. Совместное введение стеклопорошка и золы-уноса приводит к снижению средней плотности силикатного кирпича с 1910–1950 до 1650–1700 кг/м³.

6. Коэффициент теплопроводности снижается с 0,88–0,91 до 0,52–0,54 Вт/(м·К), что подтверждает возможность существенного повышения теплозащитных характеристик материала.

7. Снижение теплопроводности обусловлено не только уменьшением плотности, но и качественной перестройкой порового пространства, формированием мелких гелевых и капиллярных пор и сокращением непрерывных путей теплопереноса.

8. Рациональными признаны составы, содержащие 10 % стеклопорошка и 10–15 % золы-уноса. Они обеспечивают снижение теплопроводности на 25–30 % при сохранении прочности при сжатии не ниже 17,5 МПа и морозостойкости F27–F35.

9. Состав с 20 % золы обеспечивает минимальную теплопроводность, однако требует дополнительного исследования долговечности, влагостойкости и стабильности эксплуатационных показателей.

10. Разработанные составы могут быть получены без принципиального изменения существующего промышленного режима производства силикатного кирпича, что определяет перспективность их последующей опытно-промышленной апробации.

ГЛАВА 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕКЛОПОРОШКА И КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЛЕГЧЕННОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

5.1 Научное обоснование совместного использования стеклопорошка и керамзитовой пыли

Стеклопорошок является источником аморфного SiO_2 и активным участником гидротермальных реакций, керамзитовая пыль представляет собой обожженный микропористый алюмосиликатный материал, стеклопорошок влияет преимущественно на химическое структурообразование, керамзитовая пыль одновременно влияет на химические процессы, плотность, поровую структуру, теплопроводность и цвет изделий.

Научная гипотеза формулируется следующим образом: Совместное введение стеклопорошка и керамзитовой пыли позволяет объединить реакционную способность аморфного кремнезема стекла с микропористой алюмосиликатной структурой отхода керамзитового производства, обеспечивая снижение средней плотности и теплопроводности при сохранении нормативной прочности автоклавного силикатного кирпича.

5.2 Образование и сырьевая характеристика керамзитовой пыли ТОО «СТРОЙКОМБИНАТ»

Керамзитовая пыль образуется при производстве керамзитового щебня на предприятии ТОО «СТРОЙКОМБИНАТ» в г. Уральске. Производительность предприятия составляет более 200 тыс. м^3 керамзита в год, при этом ежегодно образуется свыше 500 м^3 пылевидного отхода. Пыль уносится из вращающейся печи потоком газов, улавливается фильтрами и собирается в специальных емкостях. В настоящее время значительная ее часть направляется на полигон твердых отходов.



Рисунок 5.1 – Общий вид керамзитовой пыли, образующейся на ТОО «СТРОЙКОМБИНАТ»

Керамзитовая пыль представляет собой тонкодисперсный материал темно-красного или коричнево-красного цвета. Характерная окраска обусловлена высокотемпературным обжигом монтмориллонитовой глины и наличием соединений железа. Пылевидное состояние материала исключает необходимость предварительного крупного дробления и создает предпосылки для его непосредственного использования в составе силикатной массы после сушки, просеивания и, при необходимости, дополнительной классификации.

5.3 Химический состав и физические свойства керамзитовой пыли

Химический состав керамзитовой пыли характеризуется преобладанием кремнезема и оксида алюминия.

Таблица 5.1 – Химический состав керамзитовой пыли ТОО «СТРОЙКОМБИНАТ»

Компонент	Содержание, мас. %
SiO ₂	59,07
TiO ₂	0,97
Al ₂ O ₃	17,82
Fe ₂ O ₃	9,64
MnO	0,44
CaO	1,78
MgO	2,97
Na ₂ O	0,85
K ₂ O	2,23
P ₂ O ₅	0,25
SO ₃	0,91
Потери/летучие компоненты	3,07

Суммарное содержание SiO₂ и Al₂ O₃ составляет 76,89 %, что позволяет отнести материал к кремнеземисто-алюмосиликатному сырью. Повышенное содержание Fe₂ O₃ объясняет естественную красно-коричневую окраску и возможность получения цветного силикатного кирпича без введения специальных синтетических пигментов.

Средняя насыпная плотность керамзитовой пыли составляет 600–800 кг/м³, что значительно ниже плотности кварцевого песка. В статье также приведено значение удельной поверхности, определенной методом газопроницаемости Козени—Кармана на приборе ПСХ-17. При переносе в монографию единицу измерения этого показателя необходимо проверить по первичному протоколу прибора: в тексте статьи указано «2800–3000 г/см²», что, вероятно, является технической опечаткой в обозначении размерности.

5.4 Макро- и микроструктура керамзитовой пыли

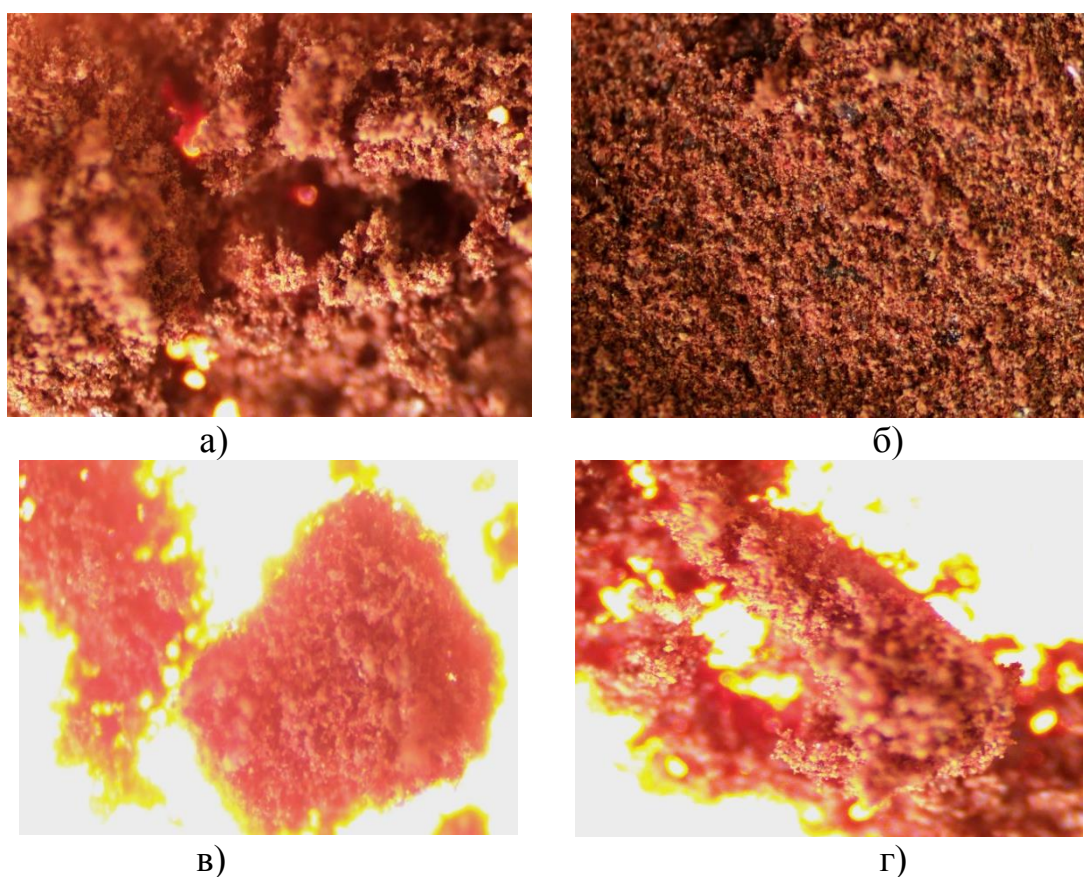
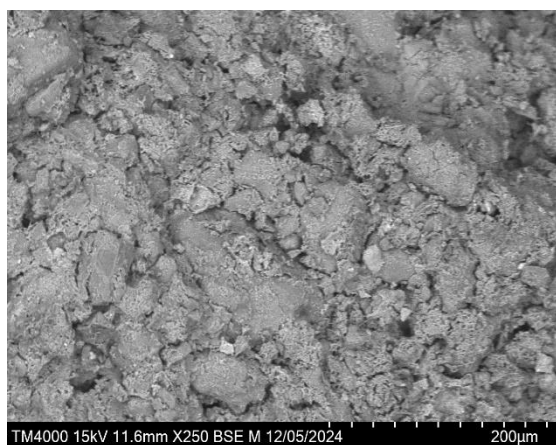
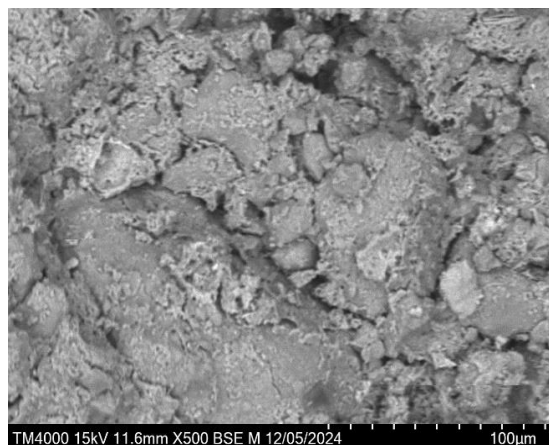


Рисунок 5.2 – Макроструктура керамзитовой пыли при увеличении $\times 100$:
а, б — поверхность агрегатов; в, г — отдельные дисперсные частицы

Оптические микрофотографии показывают неоднородную шероховатую поверхность и наличие развитой пористой структуры. Частицы представлены как рыхлыми агрегатами, так и отдельными фрагментами неправильной формы. Такая морфология способствует механическому сцеплению с гидросиликатной матрицей и формированию локальной микропористости.



а)



б)

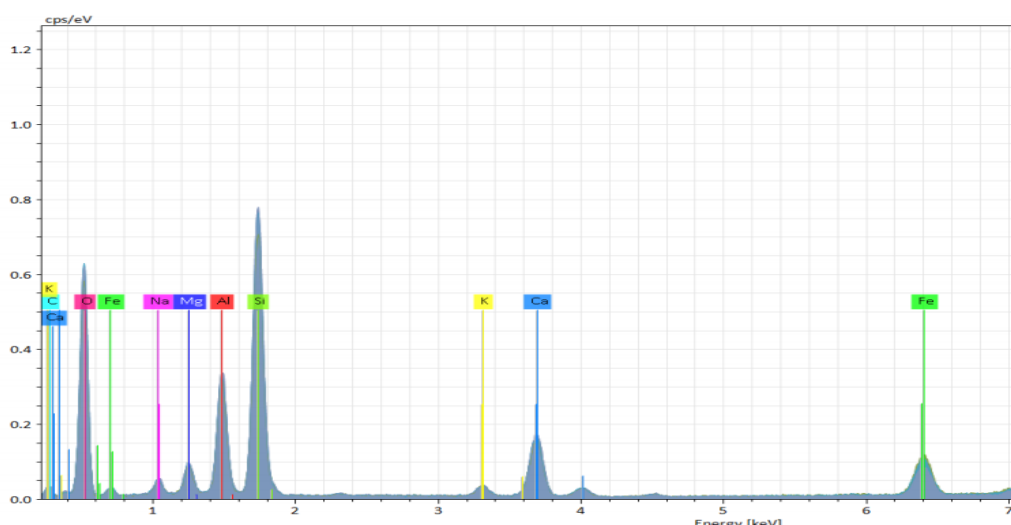


Рисунок 5.3 – Результаты СЭМ- и EDS-исследования керамзитовой пыли: а — увеличение $\times 250$; б — увеличение $\times 500$; в — энергодисперсионный спектр

СЭМ-изображения подтверждают полидисперсность, угловатую форму частиц, развитый рельеф поверхности и наличие внутренних и поверхностных пор. EDS-анализ выявляет преобладание O, Si и Al при наличии Ca, Fe, Mg, Na и K. Совокупность данных подтверждает алюмосиликатную природу материала и возможность его участия в формировании смешанных C–S–H- и C–(A)–S–H-подобных продуктов при автоклавном твердении.

Таблица 5.2 – Средний элементный состав керамзитовой пыли по данным EDS

Элемент	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Среднее содержание, мас. %	44,70	1,08	1,70	7,54	24,87	1,40	9,64	6,47

5.5 Разработка экспериментальных составов

В статье исследованы три состава, различающиеся содержанием заводской силикатной массы, стеклопорошка и керамзитовой пыли.

Таблица 5.3 – Составы силикатных композиций со стеклопорошком и керамзитовой пылью

Состав	Заводская силикатная масса, мас. %	Стеклопорошок, мас. %	Керамзитовая пыль, мас. %
Контрольный	100	0	0
№1	87	3	10
№2	75	5	20
№3	60	10	30

Для исследований использовались частицы стеклопорошка и керамзитовой пыли размером 0,14–1,25 мм.

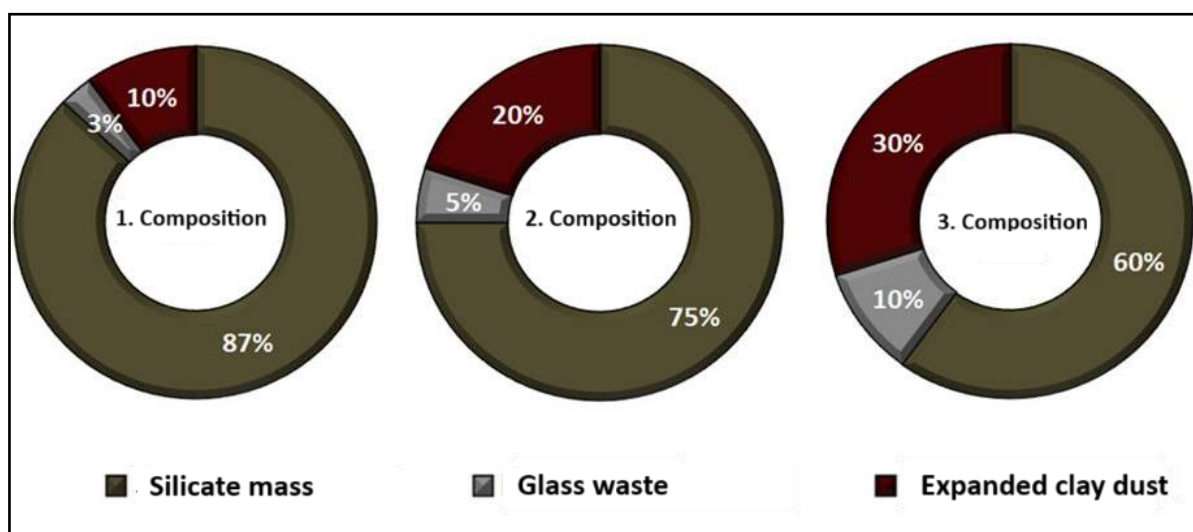


Рисунок 5.4 – Компонентный состав экспериментальных силикатных композиций

5.6 Формование и автоклавная обработка

Сырьевые компоненты дозировали на электронных весах и перемешивали до равномерного распределения добавок. Формовочная влажность составляла около 10 % от массы сухих компонентов.

Образцы цилиндрической формы размером приблизительно Ø50 × 50 мм получали методом полусухого прессования на гидравлическом прессе ПСУ-10 при давлении 12 МПа. Автоклавную

обработку проводили в заводских условиях по режиму: подъем температуры и давления — 2 часа, изотермическая выдержка — 6 часов, снижение температуры и охлаждение — 2 часа.

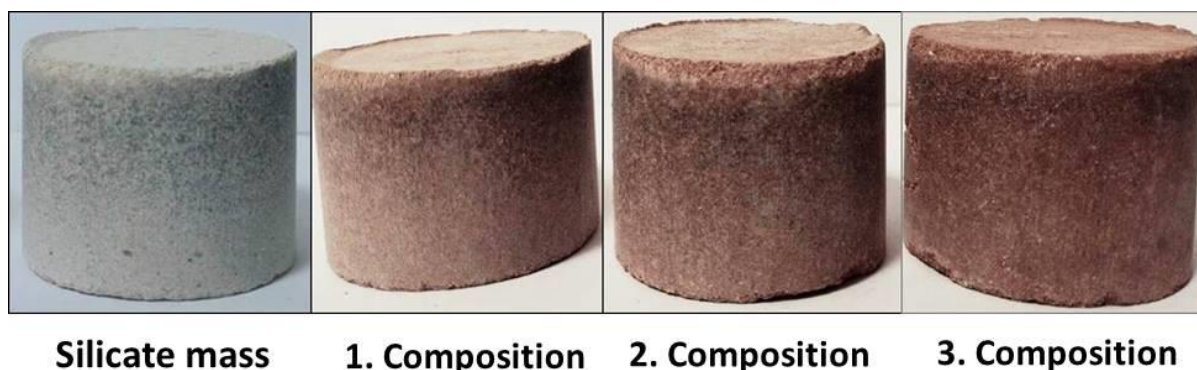


Рисунок 5.5 – Общий вид образцов после автоклавного твердения: контрольный образец и составы №1–№3

С увеличением содержания керамзитовой пыли цвет образцов последовательно изменяется от традиционного светло-серого до светло-коричневого и красно-коричневого. Это подтверждает возможность объемного окрашивания силикатного кирпича природным железосодержащим компонентом без применения отдельных пигментов.

5.7 Физико-механические и теплофизические свойства

Проверка эффективности разработанных составов осуществлялась на основании комплексной оценки физико-механических и теплофизических характеристик силикатного кирпича, сформировавшихся после завершения процессов гидротермального твердения. В качестве основных критериев оценки были выбраны средняя плотность, прочность при сжатии, коэффициент теплопроводности и водопоглощение, поскольку именно эти показатели наиболее полно отражают влияние стеклопорошка и керамзитовой пыли на процессы структурообразования, формирование порового пространства и эксплуатационные свойства материала. Сопоставление полученных результатов позволяет установить оптимальное соотношение между снижением плотности и теплопроводности, сохранением достаточной механической прочности и допустимым уровнем водопоглощения. Результаты испытаний представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Свойства образцов со стеклопорошком и керамзитовой пылью

Состав	Средняя плотность, г/см ³	Прочность при сжатии, МПа	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Водопоглощение, %
Контрольный	1,80	47,8	0,87	15,2
№1	1,78	45,7	0,78	16,7
№2	1,74	38,6	0,67	18,3
№3	1,69	30,3	0,56	20,2

Результаты показывают последовательное снижение средней плотности и теплопроводности по мере увеличения доли вторичных компонентов. Средняя плотность уменьшается с 1,80 до 1,69 г/см³, а теплопроводность — с 0,87 до 0,56 Вт/(м·К). Одновременно прочность при сжатии снижается с 47,8 до 30,3 МПа, однако остается на высоком уровне для стеновых материалов. Водопоглощение возрастает с 15,2 до 20,2 %.

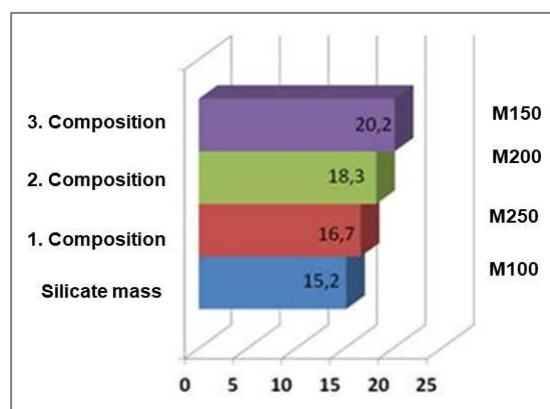
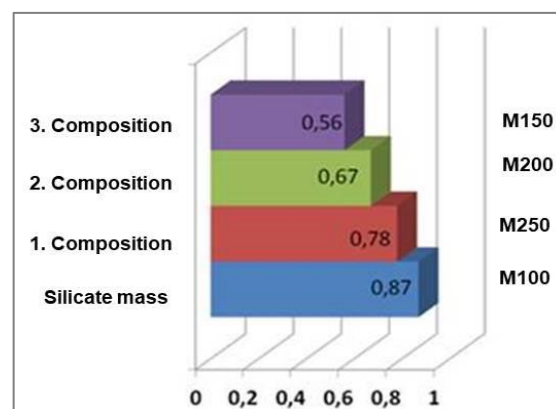
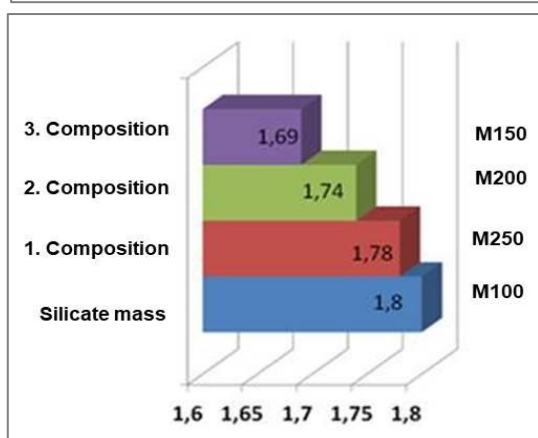
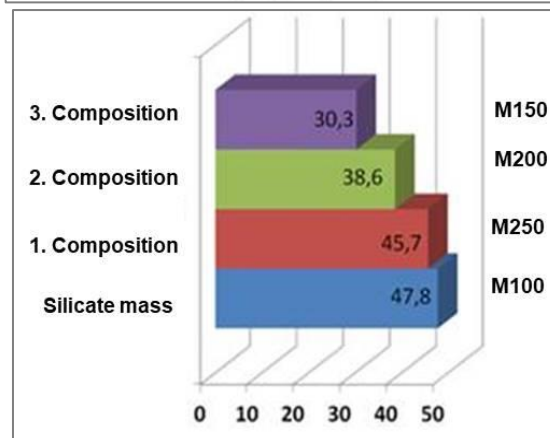


Рисунок 5.6 – Влияние содержания стеклопорошка и керамзитовой пыли на среднюю плотность, прочность при сжатии, теплопроводность и водопоглощение

Снижение средней плотности от 1,80 до 1,69 г/см³ составляет около 6,1 %, тогда как уменьшение теплопроводности от 0,87 до 0,56 Вт/(м·К) достигает приблизительно 35,6 %. Поэтому формулировку статьи о снижении «средней плотности и теплопроводности на 25–30 %» необходимо уточнить: для двух показателей относительные изменения существенно различаются.

Более интенсивное снижение теплопроводности по сравнению с плотностью свидетельствует о качественной перестройке порового пространства. Керамзитовая пыль не только уменьшает объемную долю плотного кварцево-силикатного каркаса, но и вносит собственную внутривпоровую структуру. В результате увеличивается термическое сопротивление материала.

Снижение прочности связано с уменьшением доли заводской силикатной массы с 100 до 60 %, ростом общей пористости и увеличением количества легких алюмосиликатных частиц. Однако показатель 30,3 МПа для состава №3 остается значительно выше минимальных требований для многих видов стеновых изделий.

Состав №2, содержащий 5 % стеклопорошка и 20 % керамзитовой пыли, может рассматриваться как наиболее сбалансированный: средняя плотность — 1,74 г/см³, теплопроводность — 0,67 Вт/(м·К), прочность при сжатии — 38,6 МПа, водопоглощение — 18,3 %.

Состав №3 обеспечивает наименьшую теплопроводность, но отличается максимальным водопоглощением и наиболее выраженным снижением прочности.

5.8 Микроструктура модифицированного силикатного кирпича

Комплексная оценка физико-механических и теплофизических свойств показала, что введение стеклопорошка и керамзитовой пыли сопровождается закономерным снижением средней плотности и коэффициента теплопроводности при сохранении достаточно высокого уровня прочности. Подобные изменения свидетельствуют о существенном преобразовании процессов гидротермального структурообразования и формировании новой микроструктурной организации силикатной матрицы.

Для установления механизмов действия исследуемых добавок, оценки характера взаимодействия компонентов, выявления особенностей образования гидратных новообразований и анализа порового пространства были проведены исследования микроструктуры образцов методом

сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализом. Полученные результаты позволяют научно обосновать влияние совместного использования стеклопорошка и керамзитовой пыли на формирование структуры и эксплуатационных свойств силикатного кирпича (рис. 5.7)

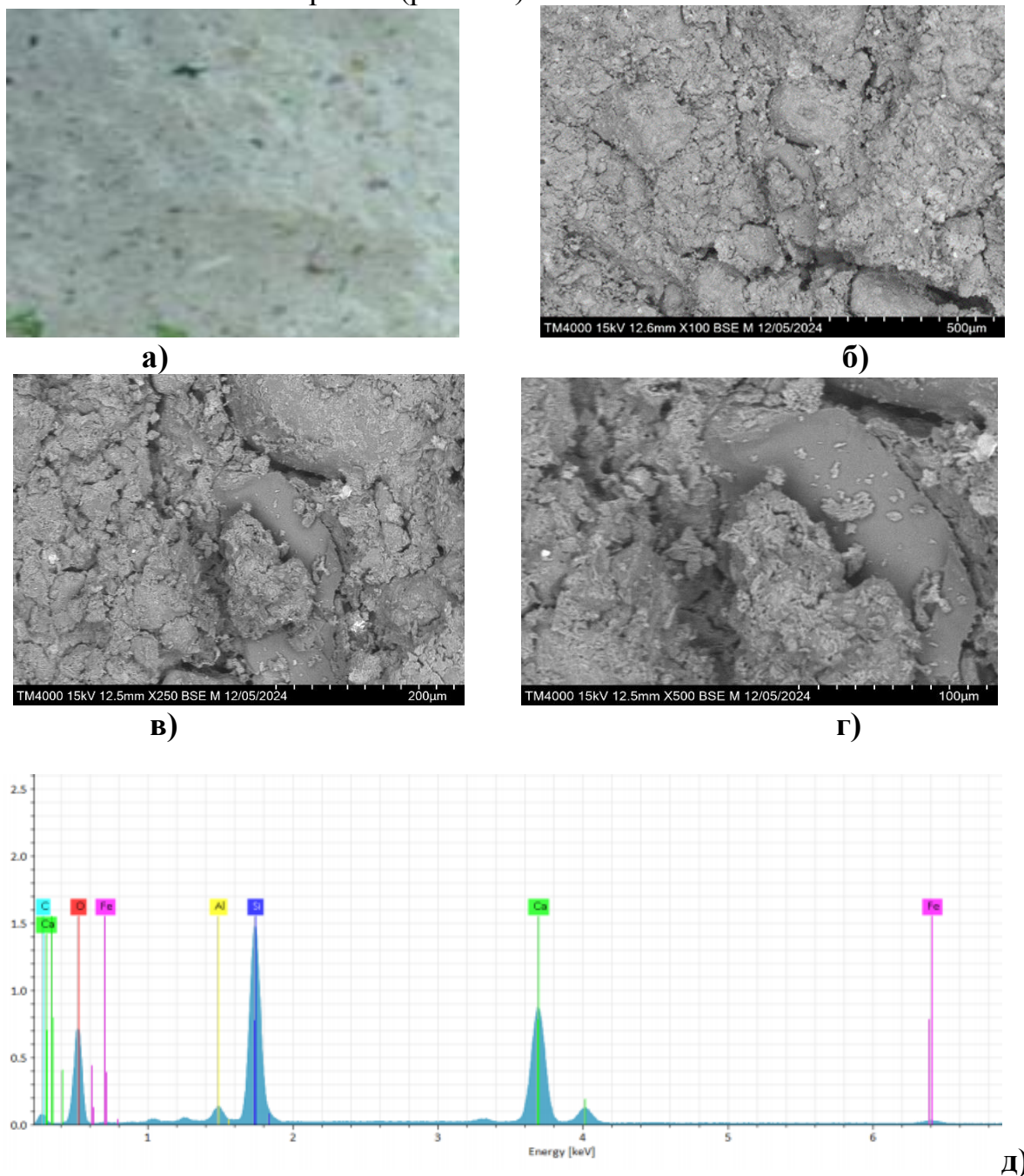


Рисунок 5.7 – Структура силикатного кирпича со стеклопорошком и керамзитовой пылью: а — макроструктура; б — СЭМ $\times 100$; в — СЭМ $\times 250$; г — СЭМ $\times 500$; д — EDS-спектр

На макроструктурном уровне наблюдается относительно равномерное распределение частиц добавок в силикатной матрице. СЭМ-изображения показывают обволакивание частиц продуктами автоклавного

твердения и образование конгломератной структуры. При этом сохраняются пористые участки, связанные с внутренней структурой керамзитовой пыли. Такая комбинация плотных контактных зон и микропористых включений объясняет одновременное сохранение высокой прочности и существенное снижение теплопроводности. Средний локальный элементный состав модифицированного образца включает около Si - 23,07 %, Al - 7,95 %, Ca - 13,60 % и Fe - 5,07 %. Это подтверждает формирование многокомпонентной кальций-кремний-алюминиевой системы.

5.9 Механизм совместного влияния компонентов

Комплекс выполненных исследований, включающий определение физико-механических и теплофизических характеристик, рентгенофазовый анализ, сканирующую электронную микроскопию и локальный элементный анализ, позволил получить всестороннюю информацию о процессах формирования структуры силикатного кирпича при совместном использовании стеклопорошка и керамзитовой пыли.

Совокупность экспериментальных данных свидетельствует, что улучшение эксплуатационных характеристик обусловлено не отдельным воздействием каждого компонента, а их взаимодополняющим влиянием на процессы гидротермального синтеза, образование гидросиликатной матрицы и формирование оптимизированного порового пространства.

В связи с этим заключительным этапом настоящего этапа исследования является разработка научно обоснованного механизма совместного влияния стеклопорошка и керамзитовой пыли, позволяющего установить причинно-следственную взаимосвязь между составом силикатной композиции, особенностями структурообразования и формированием комплекса эксплуатационных свойств материала.

Механизм действия стеклопорошка и керамзитовой пыли можно представить следующим образом: стеклопорошок → поставка аморфного и реакционноспособного SiO_2 ; → ускорение образования гидросиликатной матрицы; керамзитовая пыль → поставка обожженного алюмосиликатного компонента, → участие наиболее активной части в гидротермальных реакциях, → формирование микропористых включений, → снижение плотности и теплопроводности, → естественное окрашивание материала, совместное действие → образование плотных контактов между частицами; → формирование смешанной гидросиликатно-алюмосиликатной матрицы; → сохранение прочности при развитии мелкопористой структуры.

Выводы по главе 5

1. Обоснована целесообразность совместного использования переработанного стеклопорошка и керамзитовой пыли ТОО «СТРОЙКОМБИНАТ» в качестве активно-минеральных и структурорегулирующих компонентов силикатной массы. Такое сочетание позволяет одновременно решать задачи утилизации региональных промышленных отходов, снижения материалоемкости и повышения энергоэффективности стеновых изделий.

2. Установлено, что керамзитовая пыль образуется при высокотемпературном обжиге монтмориллонитовой глины в процессе производства керамзитового щебня. Материал характеризуется тонкодисперсным состоянием, развитой шероховатой поверхностью, микропористостью и сравнительно низкой насыпной плотностью, составляющей 600–800 кг/м³.

3. Химический состав керамзитовой пыли представлен преимущественно SiO₂ — 59,07 %, Al₂ O₃ — 17,82 % и Fe₂ O₃ — 9,64 %. Суммарное содержание кремнезема и оксида алюминия достигает 76,89 %, что позволяет отнести данный отход к алюмосиликатному сырью, потенциально способному участвовать в процессах гидротермального структурообразования.

4. Результаты СЭМ- и EDS-исследований подтвердили наличие в составе керамзитовой пыли частиц неправильной формы с развитым рельефом и внутренней пористостью. Основными элементами являются кислород, кремний, алюминий, кальций и железо, что подтверждает алюмосиликатную природу материала и возможность формирования многокомпонентной кальций-кремний-алюминиевой гидратной матрицы.

5. Разработаны экспериментальные составы, включающие 87–60 % заводской силикатной массы, 3–10 % стеклопорошка и 10–30 % керамзитовой пыли. Такое варьирование позволило проследить влияние последовательного увеличения доли вторичных компонентов на плотность, прочность, теплопроводность, водопоглощение и внешний вид автоклавированных образцов.

6. Установлена технологическая совместимость исследованных добавок с традиционным способом производства силикатного кирпича. Образцы были получены методом полусухого прессования при влажности около 10 %, давлении 12 МПа и последующей автоклавной обработке по заводскому режиму, включающему подъем температуры, шестичасовую изотермическую выдержку и контролируемое охлаждение.

7. Введение стеклопорошка и керамзитовой пыли сопровождается закономерным снижением средней плотности с 1,80 г/см³ у контрольного образца до 1,69 г/см³ у состава с максимальным содержанием добавок. Относительное снижение составляет около 6,1 % и обусловлено уменьшением доли плотной заводской силикатной массы и введением легкого микропористого компонента.

8. Коэффициент теплопроводности снижается с 0,87 до 0,56 Вт/(м·К), то есть приблизительно на 35,6 %. Более значительное уменьшение теплопроводности по сравнению со средней плотностью свидетельствует о качественном изменении структуры порового пространства и существенном вкладе внутренних пор частиц керамзитовой пыли в повышение термического сопротивления материала.

9. Прочность при сжатии модифицированных образцов находится в диапазоне 30,3–45,7 МПа при значении 47,8 МПа у контрольного состава. Несмотря на снижение прочности с увеличением содержания легких добавок, все исследованные образцы сохраняют высокий уровень механической надежности, достаточный для изготовления стеновых изделий соответствующего назначения.

10. Установлено, что снижение прочности не является пропорциональным высокой степени замещения заводской силикатной массы. Это объясняется участием активного кремнезема стеклопорошка и реакционноспособной части керамзитовой пыли в формировании дополнительных гидросиликатных и алюмосиликатных продуктов, обеспечивающих прочное связывание частиц в единую конгломератную структуру.

11. Водопоглощение возрастает с 15,2 % у контрольного образца до 20,2 % у состава с максимальным содержанием добавок. Повышение показателя связано с развитой открытой и внутренней пористостью керамзитовой пыли, а также с увеличением общей доли капиллярных пор. Поэтому при промышленном применении необходимо нормировать содержание добавки с учетом требуемой водостойкости и условий эксплуатации изделий.

12. СЭМ-анализ автоклавированных образцов показал равномерное распределение стеклопорошка и керамзитовой пыли в силикатной матрице, обволакивание частиц продуктами гидротермального твердения и формирование прочных межфазных контактов. Одновременно сохраняются микропористые участки, обеспечивающие снижение плотности и теплопроводности.

13. Наиболее сбалансированным признан состав, содержащий 75 % заводской силикатной массы, 5 % стеклопорошка и 20 % керамзитовой пыли. Для него получены средняя плотность 1,74 г/см³, прочность при сжатии 38,6 МПа, коэффициент теплопроводности 0,67 Вт/(м·К) и водопоглощение 18,3 %. Данный состав сочетает существенное улучшение теплофизических свойств с высоким запасом механической прочности.

14. Состав с 10 % стеклопорошка и 30 % керамзитовой пыли обеспечивает минимальную теплопроводность 0,56 Вт/(м·К), однако характеризуется максимальным водопоглощением и наиболее выраженным снижением прочности. Его применение целесообразно преимущественно для ненесущих или самонесущих ограждающих изделий

после дополнительной оценки морозостойкости, влагостойкости и долговечности.

15. Установлено дополнительное декоративное преимущество керамзитовой пыли. С увеличением ее содержания цвет силикатного кирпича изменяется от традиционного светло-серого до светло-коричневого и красно-коричневого оттенка. Наличие Fe_2O_3 позволяет получать объемно окрашенные изделия без применения специальных пигментов.

16. Совместное использование стеклопорошка и керамзитовой пыли создает предпосылки для снижения расхода природного кварцевого сырья и известкового компонента. Вместе с тем заявленное возможное уменьшение расхода негашеной извести на 5–10 % должно быть дополнительно подтверждено расчетами кальциевого баланса, РФА и определением остаточного свободного СаО.

17. Сформулирован общий механизм действия добавок: стеклопорошок поставляет активный аморфный кремнезем и интенсифицирует образование гидросиликатов кальция, тогда как керамзитовая пыль вводит пористый алюмосиликатный компонент, участвующий в формировании смешанной гидратной матрицы и создающий теплоизоляционные микропористые включения.

18. Использование керамзитовой пыли обладает выраженным региональным преимуществом, поскольку отход образуется непосредственно в г. Уральске. Это сокращает транспортные расходы, упрощает создание локальной производственной цепочки и позволяет одновременно утилизировать отходы ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС» и ТОО «СТРОЙКОМБИНАТ».

19. Полученные результаты подтверждают перспективность производства облегченного энергоэффективного силикатного кирпича с применением местных вторичных ресурсов. Разработанные составы обеспечивают снижение теплопроводности, сохранение высокой прочности, уменьшение нагрузки на фундаменты и возможность получения декоративно окрашенных изделий.

20. Материалы главы сформировали экспериментальную основу для последующего сравнительного анализа систем «стеклопорошок», «стеклопорошок — зола-унос» и «стеклопорошок — керамзитовая пыль» и обобщения закономерностей взаимосвязи между природой техногенного компонента, фазообразованием, поровой структурой и эксплуатационными свойствами силикатного кирпича.

ГЛАВА 6. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМООБРАБОТАННОЙ ОПОКИ В ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

6.1 Актуальность использования кремнеземистой опоки в технологии силикатного кирпича

Современное развитие строительной индустрии связано с необходимостью одновременного решения нескольких взаимосвязанных задач: снижения материалоемкости и энергоемкости производства, повышения теплозащитных характеристик ограждающих конструкций, рационального использования региональной минерально-сырьевой базы и создания долговечных стеновых материалов с нормативной механической прочностью. Особую актуальность данное направление приобретает для Республики Казахстан, значительная часть территории которой характеризуется продолжительным отопительным периодом и существенными сезонными перепадами температур. В таких условиях теплофизические свойства стеновых материалов непосредственно влияют на энергетическую эффективность зданий и затраты, связанные с их эксплуатацией.

Силикатный кирпич широко применяется в жилищном, гражданском и промышленном строительстве благодаря доступности исходного сырья, технологичности производства, стабильности геометрических параметров и достаточно высоким прочностным характеристикам. Вместе с тем традиционный силикатный кирпич обладает сравнительно высокой средней плотностью и коэффициентом теплопроводности. В представленной статье именно большая масса и повышенная теплопроводность заводской продукции рассматриваются как основные проблемы, ограничивающие энергетическую эффективность силикатных ограждающих конструкций.

Высокая средняя плотность силикатного кирпича увеличивает собственную массу стен и нагрузку на фундаменты, а повышенная теплопроводность приводит к увеличению тепловых потерь через наружные ограждения. Компенсация недостаточной теплозащиты требует увеличения толщины стен либо применения дополнительных теплоизоляционных слоев, что усложняет конструктивное решение, повышает стоимость строительства и увеличивает трудоемкость работ. Поэтому разработка облегченного силикатного кирпича с пониженным коэффициентом теплопроводности при сохранении нормативной прочности представляет собой актуальную научную и прикладную задачу.

Одним из перспективных путей решения данной задачи является введение в силикатную массу легких пористых кремнеземсодержащих

компонентов. Такие материалы способны выполнять одновременно несколько функций:

- частично замещать плотный кварцевый компонент;
- снижать среднюю плотность сырьевой композиции и готового изделия;
- формировать дополнительную микро- и макропористость;
- участвовать в процессах гидротермального структурообразования;
- увеличивать термическое сопротивление силикатного материала.

К числу подобных компонентов относится опока — природная кремнеземистая осадочная порода, отличающаяся развитой микропористой структурой, относительно низкой средней плотностью и присутствием кремнезема в различных структурных состояниях. В отличие от традиционного кварцевого песка, который преимущественно формирует жесткий каркас силикатного материала, опока способна одновременно выступать как легкий пористый наполнитель и потенциально активный кремнеземсодержащий компонент.

Применение опоки особенно перспективно после термической обработки. Термическое воздействие способствует удалению физически и химически связанной воды, изменению структуры кремнеземистой составляющей, стабилизации порового пространства и формированию более легкого зернистого материала. В исследовании использованы термообработанные фракции опоки Таскалинского месторождения со средней плотностью 600–700 кг/м³, что существенно ниже плотности традиционной известково-песчаной силикатной массы.

Использование термообработанной опоки позволяет рассматривать принципиально иной механизм повышения энергоэффективности силикатного кирпича по сравнению с введением только тонкодисперсных активных добавок. Если стеклопорошок преимущественно влияет на химические процессы растворения кремнезема и образования гидросиликатной матрицы, то термообработанная опока должна обеспечивать сочетание двух эффектов:

химико-минералогического, связанного с присутствием кремнеземистых фаз и их возможным участием в гидротермальном взаимодействии;

структурно-физического, обусловленного введением легких пористых частиц и сохранением части их внутреннего порового пространства в структуре готового кирпича.

Такое сочетание создает предпосылки для снижения средней плотности и теплопроводности без критического ухудшения прочности материала. В статье сформулирована и экспериментально проверена гипотеза, согласно которой увеличение содержания термообработанной опоки сопровождается уменьшением средней плотности и коэффициента

теплопроводности при сохранении прочностных характеристик силикатного кирпича.

Дополнительную актуальность рассматриваемому направлению придает региональная доступность сырья. Таскалинское месторождение расположено в Западно-Казахстанской области и характеризуется значительными запасами кремнеземистой опоки. Согласно приведенным в статье геологическим сведениям, запасы превышают 4570 тыс. м³, а мощность полезного слоя изменяется от 4,25 до 28 м при среднем значении 19,1 м. Наличие крупной местной сырьевой базы позволяет рассматривать опоку не только как лабораторный материал, но и как потенциальный промышленный компонент для региональных предприятий строительных материалов.

Использование местной опоки в технологии силикатного кирпича отвечает принципам территориальной привязки сырьевой базы к производству. Оно может способствовать сокращению транспортных расходов, снижению зависимости предприятий от привозных легких заполнителей и расширению ассортимента строительной продукции, выпускаемой из минерального сырья Западного Казахстана.

Особенно важно, что применение опоки не противоречит общей научной концепции настоящей монографии. В предыдущих главах рассмотрены системы со стеклопорошком, золой-уносом и керамзитовой пылью, основанные преимущественно на использовании вторичного и техногенного сырья. Включение термообработанной опоки расширяет данную концепцию и показывает возможность направленного формирования структуры силикатного кирпича не только техногенными, но и природными кремнеземистыми компонентами.

С научной точки зрения такое расширение позволяет сопоставить несколько различных механизмов модифицирования:

- химическую активацию силикатной системы аморфным стеклопорошком;
- алюмосиликатное модифицирование золой-уносом;
- структурное облегчение керамзитовой пылью;
- формирование микропористой структуры термообработанной природной опокой.

В результате монография приобретает более целостный характер и раскрывает общий подход к созданию энергоэффективных силикатных материалов на основе сочетания природного и вторичного кремнеземсодержащего сырья Казахстана.

Актуальность применения термообработанной опоки определяется также возможностью получения материала, сочетающего конструкционные и теплоизоляционные свойства. Для силикатного кирпича важен не минимально возможный коэффициент теплопроводности сам по себе, а его снижение при сохранении

достаточной прочности, морозостойкости и устойчивости к воздействию влаги. Именно такой многокритериальный подход положен в основу исследования: физико-механические свойства композиций оценивались по средней плотности, прочности при сжатии, теплопроводности, водопоглощению и морозостойкости.

Выполненные исследования показали, что при увеличении содержания термообработанной опоки средняя плотность образцов снижалась от 1,76 до 1,52 г/см³, а коэффициент теплопроводности — от 0,80 до 0,64 Вт/(м·К). При этом прочность при сжатии находилась в диапазоне 21,4–48,6 МПа и сохранялась на уровне, соответствующем требованиям к силикатным изделиям. Эти результаты подтверждают принципиальную возможность использования опоки для управления теплофизическими свойствами силикатного кирпича.

Вместе с тем применение пористого компонента сопровождается увеличением водопоглощения, которое в исследованных составах находилось в диапазоне 17,95–25,15 %. Это обстоятельство подчеркивает необходимость рационального выбора содержания опоки. Максимальная дозировка не должна автоматически рассматриваться как оптимальная: снижение плотности и теплопроводности необходимо сопоставлять с прочностью, водопоглощением, морозостойкостью и предполагаемыми условиями эксплуатации изделий.

Таким образом, актуальность использования кремнеземистой опоки в технологии силикатного кирпича определяется совокупностью следующих факторов:

1. необходимостью снижения средней плотности и теплопроводности традиционного силикатного кирпича;
2. возможностью использования термообработанной опоки как легкого микропористого кремнеземсодержащего компонента;
3. сочетанием физического порообразующего и потенциального химического структурообразующего действия опоки;
4. наличием значительных запасов природного сырья в Западно-Казахстанской области;
5. возможностью расширения региональной сырьевой базы силикатной промышленности;
6. сохранением нормативной прочности при улучшении теплофизических характеристик;
7. перспективой создания конструкционно-теплоизоляционного силикатного кирпича для повышения энергоэффективности зданий;
8. соответствием данного направления общей научной концепции комплексного использования природного и техногенного кремнеземсодержащего сырья Казахстана.

На основании изложенного цель исследований, представленных в настоящей главе, заключается в установлении закономерностей влияния

содержания термообработанной опоки Таскалинского месторождения на среднюю плотность, теплопроводность, прочность, водопоглощение и морозостойкость автоклавного силикатного материала, а также в научном обосновании рациональной области ее использования в составе энергоэффективного силикатного кирпича.

6.2 Характеристика термообработанной опоки Таскалинского месторождения

В качестве природного кремнеземсодержащего компонента для модифицирования силикатной массы в настоящем исследовании использована опока Таскалинского месторождения Западно-Казахстанской области. Выбор данного сырья обусловлен его региональной доступностью, значительными запасами, выраженной микропористой структурой и сравнительно низкой средней плотностью после термической обработки.

Опока представляет собой легкую, твердую и микропористую осадочную кремнеземистую породу. По данным, приведенным в статье, опоки Таскалинского месторождения приурочены к палеогеновым и меловым отложениям и сформировались в морских бассейнах в результате уплотнения и цементации диатомитов и трепелов. Запасы месторождения превышают 4570 тыс. м³. Полезная толща представлена светло-серыми и серыми тонкослоистыми пористыми опоками с мощностью от 4,25 до 28 м при среднем значении 19,1 м.

Минералогический состав опоки включает кварц, пористый кремнезем, соединения железа и полевошпатовые примеси. В статье отмечено присутствие фаз SiO_2 , Fe_2O_3 и алюмосиликатных соединений типа $(\text{Na},\text{K})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$. Такая совокупность компонентов позволяет рассматривать опоку как полиминеральное кремнеземистое сырье, способное одновременно выполнять функции легкого пористого заполнителя и структурообразующего компонента автоклавной силикатной системы.

Принципиальное отличие опоки от традиционного кварцевого песка заключается в ее пористом строении и меньшей средней плотности. Кварцевый песок в составе силикатной массы преимущественно образует плотный минеральный каркас и участвует в гидротермальном взаимодействии главным образом через поверхность зерен. Опока, напротив, содержит развитую систему внутренних и поверхностных пор, вследствие чего способна изменять не только химическую, но и пространственную организацию формирующейся структуры.

В исследовании опока использовалась после термической обработки. В статье указано, что средняя плотность термообработанных фракций составляла 600–700 кг/м³. Низкое значение данного показателя создает

предпосылки для снижения средней плотности силикатного материала при частичной замене заводской силикатной массы.

Термическая обработка опоки имеет несколько технологических функций. Она обеспечивает удаление свободной и части связанной влаги, стабилизирует минеральную структуру, уменьшает вероятность последующих объемных изменений и способствует формированию более устойчивого пористого зерна. Вместе с тем статья не содержит сведений о конкретной температуре и продолжительности термообработки. Поэтому в монографии эти параметры следует приводить только при наличии первичного лабораторного журнала или отдельного технологического протокола. Без такого подтверждения корректно использовать обобщенную формулировку «термообработанная опока».

Для приготовления пористого заполнителя опоку дробили до получения фракции 0,14–1,25 мм. Выбор данного диапазона обеспечивал возможность равномерного распределения частиц в объеме силикатной массы и их совместимость с методом полусухого прессования. Нижняя граница ограничивала избыточное количество пылевидной фракции, способной повышать водопотребность, а верхняя снижала риск образования крупных структурных неоднородностей.

С материаловедческой позиции термообработанная опока может выполнять в силикатной композиции несколько взаимосвязанных функций:

1. Легкого пористого заполнителя. Низкая средняя плотность частиц способствует уменьшению массы единицы объема готового материала.

2. Кремнеземсодержащего компонента. Присутствие SiO_2 создает предпосылки для участия поверхностной части зерен в гидротермальном взаимодействии с известковым компонентом.

3. Регулятора поровой структуры. Внутренние поры опоки частично сохраняются после формования и автоклавирования и повышают термическое сопротивление материала.

4. Структурного микроносителя. Шероховатая поверхность частиц способствует механическому сцеплению с продуктами гидротермального твердения.

5. Компонента региональной сырьевой базы. Использование местной породы снижает зависимость от привозных легких заполнителей и расширяет возможности ресурсосберегающего производства.

Особого внимания заслуживает соотношение физического и химического механизмов действия опоки. На основании данных статьи можно уверенно говорить о выраженном физическом эффекте, связанном с низкой плотностью и пористостью материала. В то же время прямых результатов РФА, СЭМ или химической активности термообработанной опоки в статье не приведено. Поэтому утверждение о ее интенсивном

участии в образовании конкретных гидросиликатных фаз следует рассматривать как научно обоснованную гипотезу, требующую отдельного инструментального подтверждения.

Для более полного представления свойств исследуемого материала целесообразно включить в монографию сводную таблицу.

Таблица 6.1 – Основные характеристики опоки Таскалинского месторождения

Показатель	Характеристика
Генетический тип	Осадочная кремнеземистая порода
Геологический возраст	Палеогеновые и меловые отложения
Цвет	Светло-серый, серый
Строение	Тонкослоистое, пористое
Запасы месторождения	Более 4570 тыс. м ³
Мощность полезной толщи	4,25–28 м
Средняя мощность	19,1 м
Основные минералогические компоненты	Кварц, пористый SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , полевошпатовые примеси
Средняя плотность термообработанной фракции	600–700 кг/м ³
Размер использованной фракции	0,14–1,25 мм
Предполагаемая функция в составе	Легкий пористый кремнеземсодержащий наполнитель

Приведенные характеристики подтверждают соответствие термообработанной опоки требованиям, предъявляемым к легким пористым компонентам силикатных композиций. Ее низкая плотность и развитая пористость создают предпосылки для снижения теплопроводности, а наличие кремнеземистой составляющей позволяет обеспечить совместимость с известково-песчаной системой автоклавного твердения.

Для наглядного представления геологической природы, внешнего вида и структуры сырья в монографии рекомендуется предусмотреть следующий иллюстративный материал:



Рисунок 6.1 – Общий вид исходной и термообработанной опоки Таскалинского месторождения.



Рисунок 6.2 – Фракционный состав термообработанной опоки размером 0,14–1,25 мм.

В научной концепции монографии термообработанная опока занимает особое положение. Стеклопорошок используется преимущественно как активный аморфный кремнеземсодержащий модификатор; зола-унос — как техногенный алюмосиликатный компонент; керамзитовая пыль — как обожженный микропористый отход. Опока объединяет свойства природного кремнеземистого сырья и легкого пористого заполнителя, что позволяет рассматривать ее как самостоятельный инструмент управления структурой и теплофизическими свойствами силикатного кирпича.

Таким образом, геологические, минералогические и физические особенности опоки Таскалинского месторождения обосновывают перспективность ее использования в технологии энергоэффективного силикатного кирпича. Низкая средняя плотность термообработанных фракций, развитое поровое пространство, наличие кремнезема и региональная доступность сырья сформировали основу для разработки экспериментальных составов с содержанием опоки 10, 20 и 30 мас. %, методика получения и испытания которых рассматривается в следующем разделе.

6.3 Методика получения силикатных композиций с использованием термообработанной опоки

После обоснования перспективности применения термообработанной опоки в качестве природного кремнеземсодержащего компонента следующей задачей исследования являлась разработка

экспериментальных составов силикатной массы и оценка влияния содержания опоки на процессы формирования структуры и эксплуатационные свойства автоклавного силикатного кирпича.

Методика исследований разрабатывалась с учетом необходимости обеспечения сопоставимости получаемых результатов с предыдущими этапами настоящей монографии, посвященными изучению стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли. Поэтому основные технологические операции приготовления силикатной массы, формования образцов и гидротермальной обработки были максимально приближены к традиционной технологии производства силикатного кирпича.

В основу экспериментальной программы был положен принцип последовательного увеличения содержания термообработанной опоки при сохранении неизменными остальных технологических параметров. Такой подход позволил выявить влияние именно содержания пористого кремнеземистого компонента на процессы структурообразования и основные физико-механические характеристики материала.

6.3.1 Исходные материалы

Для приготовления экспериментальных силикатных композиций использовались:

- заводская силикатная масса, применяемая при производстве автоклавного силикатного кирпича;
- термообработанная опока Таскалинского месторождения Западно-Казахстанской области;
- вода затворения.

В качестве базовой композиции использовалась традиционная силикатная масса без добавления опоки, которая служила контрольным составом при сравнительном анализе результатов.

Термообработанная опока предварительно подвергалась дроблению и севу до получения зернистого материала размером 0,14–1,25 мм. Такой диапазон крупности обеспечивал равномерное распределение частиц в объеме силикатной массы и соответствовал требованиям технологии полусухого прессования.

До начала приготовления смесей контролировались:

- гранулометрический состав заполнителя;
- влажность сырья;
- отсутствие посторонних включений;
- однородность термообработанной опоки.

Проведение входного контроля обеспечивало воспроизводимость экспериментальных результатов и исключало влияние случайных факторов на свойства готовых изделий.

6.3.2 Разработка экспериментальных составов

Для оценки влияния содержания опоки были разработаны три экспериментальные композиции с различной степенью замещения заводской силикатной массы.

В исследовании использовали следующие составы, представленные в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Составы экспериментальных силикатных композиций с использованием термообработанной опоки

Обозначение состава	Заводская силикатная масса, %	Термообработанная опока, %
Контроль	100	0
Состав 1	90	10
Состав 2	80	20
Состав 3	70	30

Для установления закономерностей влияния содержания термообработанной опоки на свойства силикатного кирпича были разработаны три экспериментальные композиции, предусматривающие последовательное увеличение количества пористого кремнеземистого компонента при одновременном уменьшении доли традиционной силикатной массы. Такой подход позволил оценить влияние каждого уровня замещения на процессы структурообразования и эксплуатационные характеристики готового материала. Составы исследованных композиций представлены в таблице 6.2.

Как видно из таблицы, максимальное содержание термообработанной опоки составляло 30 %. Выбор данного значения обусловлен необходимостью сохранения конструкционной прочности силикатного кирпича при одновременном достижении заметного снижения средней плотности и коэффициента теплопроводности.

Следует отметить, что увеличение содержания пористого заполнителя сопровождается изменением не только объемной структуры материала, но и характера взаимодействия между зернами силикатной массы. Поэтому каждое последующее увеличение количества опоки должно рассматриваться как изменение всей композиционной системы, а не только соотношения компонентов.

6.3.3 Приготовление силикатной массы

Приготовление экспериментальных смесей осуществлялось методом последовательного смешивания компонентов.

Вначале заводская силикатная масса соединялась с рассчитанным количеством термообработанной опоки, после чего производилось интенсивное перемешивание до получения однородной композиции.

Особое внимание уделялось равномерности распределения пористых частиц в объеме смеси. Благодаря близкому гранулометрическому составу силикатной массы и термообработанной опоки удавалось избежать выраженного расслоения композиции.

После получения однородной смеси вводилась вода затворения.

Согласно методике исследования влажность силикатной массы поддерживалась на уровне **9–10 %**, что соответствовало требованиям технологии полусухого прессования.

Указанная влажность обеспечивала:

- достаточную пластичность смеси;
- устойчивое заполнение пресс-форм;
- получение прочного сырца;
- отсутствие разрушения образцов после прессования.

6.3.4 Формование экспериментальных образцов

Изготовление образцов осуществлялось методом полусухого прессования.

Формование проводилось при удельном давлении **12 МПа**, что соответствовало принятой экспериментальной методике.

Контроль качества сырца осуществлялся непосредственно после прессования.

При этом оценивались:

- сохранение геометрической формы;
- отсутствие трещин;
- отсутствие расслоения;
- устойчивость к транспортированию;
- однородность структуры.

Использование полусухого прессования позволяло воспроизводить технологические условия, максимально приближенные к промышленному производству силикатного кирпича.

6.3.5 Автоклавная обработка

После завершения формования образцы подвергались гидротермальному твердению в лабораторном автоклаве.

Согласно методике исследования автоклавная обработка осуществлялась по режиму:

2 + 6 + 2 часа,

где:

- 2 часа — подъем температуры и давления;

- 6 часов — изотермическая выдержка;
- 2 часа — охлаждение и снижение давления.

Использование традиционного режима автоклавного твердения обеспечивало возможность сопоставления полученных результатов с предыдущими исследованиями настоящей монографии.

Во время гидротермальной обработки происходили:

- гидратация известкового компонента;
- растворение части кремнеземистой составляющей;
- образование гидросиликатов кальция;
- уплотнение структуры силикатного камня;
- формирование окончательных эксплуатационных свойств материала.

6.3.6 Методика определения свойств

После завершения автоклавной обработки экспериментальные образцы подвергались комплексным испытаниям. Определялись следующие показатели:

- средняя плотность;
- предел прочности при сжатии;
- коэффициент теплопроводности;
- водопоглощение;
- морозостойкость.

Комплекс выбранных показателей позволял всесторонне оценить влияние термообработанной опоки на эксплуатационные свойства силикатного кирпича.

Испытания проводились по стандартным методикам, применяемым для оценки качества автоклавных стеновых материалов. Полученные результаты сравнивались с контрольным составом и анализировались в зависимости от содержания термообработанной опоки.

Разработанная методика исследований позволила обеспечить высокую воспроизводимость экспериментальных результатов и сопоставимость данных с предыдущими этапами настоящей монографии. Последовательное увеличение содержания термообработанной опоки при неизменности остальных технологических параметров создало необходимые условия для установления закономерностей влияния природного кремнеземистого сырья на процессы структурообразования силикатного кирпича. Использование единой методологии исследований обеспечивает возможность корректного сравнения эффективности четырех различных направлений модифицирования силикатной массы, рассмотренных в монографии: стеклопорошком, стеклопорошком совместно с золой-уноса, стеклопорошком совместно с керамзитовой пылью и термообработанной опокой.

Разработанная методика экспериментальных исследований и подготовленные составы силикатных композиций позволили перейти к оценке влияния содержания термообработанной опоки на основные физико-механические и теплофизические свойства автоклавного силикатного кирпича. Анализ полученных экспериментальных результатов и установление закономерностей изменения свойств материала в зависимости от содержания опоки представлены в следующем разделе.

6.4 Влияние содержания термообработанной опоки на физико-механические и теплофизические свойства силикатного кирпича

Основной целью данного этапа исследований являлось установление закономерностей изменения физико-механических и теплофизических свойств силикатного кирпича при последовательном увеличении содержания термообработанной опоки в составе силикатной массы. В отличие от традиционного подхода, предусматривающего использование плотных кремнеземистых заполнителей, предложенная композиционная система основана на введении легкого природного пористого материала, способного одновременно изменять структуру силикатного камня и его теплофизические характеристики.

Комплексная оценка эффективности применения термообработанной опоки проводилась по следующим показателям:

- средней плотности;
- прочности при сжатии;
- коэффициенту теплопроводности;
- водопоглощению;
- морозостойкости.

Именно совокупность перечисленных характеристик позволяет объективно оценить возможность использования нового материала при производстве конструкционно-теплоизоляционного силикатного кирпича.

Переходной текст к рисунку:

Для выявления закономерностей влияния содержания термообработанной опоки на свойства силикатного кирпича были проведены комплексные экспериментальные исследования. Полученные результаты представлены на рисунке 6.3, который отражает изменение основных физико-механических и теплофизических показателей в зависимости от количества вводимой опоки.

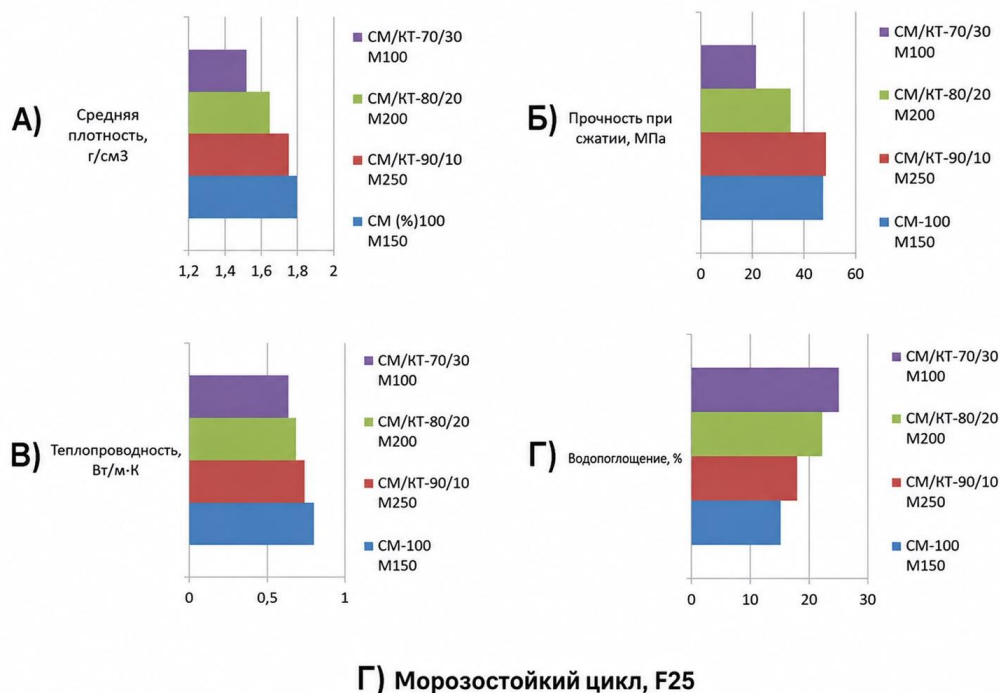


Рисунок 6.3 – Влияние содержания термообработанной опоки на физико-механические и теплофизические свойства силикатного кирпича

6.4.1 Изменение средней плотности

Одним из наиболее заметных результатов исследования является закономерное снижение средней плотности силикатного кирпича по мере увеличения содержания термообработанной опоки.

Согласно экспериментальным данным, средняя плотность контрольного состава составляла около 1,76 г/см³, тогда как при введении 30 % термообработанной опоки данный показатель снижался до 1,52 г/см³.

Таким образом, уменьшение средней плотности составило около 13,6 %.

Полученный результат объясняется несколькими взаимосвязанными факторами.

Во-первых, термообработанная опока обладает значительно меньшей средней плотностью по сравнению с традиционной силикатной массой.

Во-вторых, развитая внутренняя пористость частиц частично сохраняется после автоклавной обработки.

В-третьих, пористые зерна нарушают непрерывность плотного кварцевого каркаса, способствуя формированию более легкой композиционной структуры.

С материаловедческой точки зрения именно снижение средней плотности является первым признаком изменения внутреннего строения силикатного материала.

6.4.2 Прочность при сжатии

Несмотря на уменьшение средней плотности, полученные результаты свидетельствуют о сохранении достаточно высокой механической прочности.

По данным исследования предел прочности изменялся от 48,6 МПа для контрольного состава до 21,4 МПа при содержании 30 % термообработанной опоки.

Следовательно, снижение прочности происходило значительно медленнее, чем уменьшение средней плотности.

Данный результат имеет важное научное значение.

Если бы пористый компонент выполнял исключительно функцию облегченного заполнителя, уменьшение плотности сопровождалось бы пропорциональным снижением прочности.

Однако экспериментальные результаты показывают, что структура материала продолжает эффективно воспринимать механические нагрузки.

Это свидетельствует о сохранении достаточно прочной гидросиликатной матрицы, которая обеспечивает надежное сцепление между зернами силикатной массы и частицами термообработанной опоки.

Следовательно, введение опоки изменяет характер разрушения материала, но не приводит к критическому снижению несущей способности.

6.4.3 Коэффициент теплопроводности

Одной из основных целей исследования являлось снижение теплопроводности силикатного кирпича.

Экспериментально установлено, что увеличение содержания термообработанной опоки сопровождается устойчивым уменьшением коэффициента теплопроводности.

Согласно результатам исследования данный показатель изменялся: от 0,80 Вт/(м·К) до 0,64 Вт/(м·К).

Таким образом, снижение составило около 20 %.

Полученный эффект значительно превышает величину уменьшения плотности. Это позволяет сделать важный научный вывод: теплопроводность определяется не только средней плотностью материала, но и особенностями внутренней организации его порового пространства.

Термообработанная опока способствует формированию большого количества мелких замкнутых воздушных пор.

Именно воздух, обладающий крайне низкой теплопроводностью, становится главным теплоизоляционным компонентом новой структуры.

Следовательно, механизм снижения теплопроводности определяется сочетанием:

- уменьшения средней плотности;
- развития микропористости;
- повышения извилистости путей распространения теплового потока;
- формирования неоднородной структуры силикатного камня.

6.4.4 Водопоглощение

По мере увеличения содержания термообработанной опоки наблюдается закономерный рост водопоглощения.

В исследованных составах данный показатель изменялся от 17,95 % до 25,15 %.

Увеличение водопоглощения непосредственно связано с ростом общей открытой пористости материала.

Вместе с тем необходимо отметить, что увеличение данного показателя является закономерным следствием облегчения структуры.

При выборе рационального состава необходимо учитывать компромисс между:

- снижением теплопроводности;
- уменьшением средней плотности;
- сохранением допустимого уровня водопоглощения.

Именно поэтому максимальное содержание опоки не всегда является оптимальным для практического применения.

6.4.5 Морозостойкость

Одним из наиболее интересных результатов исследования является сохранение высокой морозостойкости экспериментальных составов.

Несмотря на увеличение пористости материала, морозостойкость находилась на уровне F35–F50, что соответствует требованиям, предъявляемым к силикатному кирпичу.

Это свидетельствует о том, что сформировавшаяся поровая структура является рациональной.

Вероятно, часть мелких пор выполняет функцию компенсационных объемов, уменьшающих внутренние напряжения при замерзании воды.

Подобный механизм широко известен для легких бетонов и, как показывают результаты настоящего исследования, проявляется также в силикатных композициях с использованием термообработанной опоки.

6.4.6 Комплексная оценка результатов

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что увеличение содержания термообработанной опоки оказывает разнонаправленное влияние на свойства силикатного кирпича.

К положительным эффектам относятся:

- снижение средней плотности;
- уменьшение теплопроводности;
- сохранение нормативной морозостойкости;
- повышение энергоэффективности материала.

Одновременно наблюдаются постепенное снижение прочности и увеличение водопоглощения.

Следовательно, выбор рационального содержания опоки должен осуществляться на основе комплексной оценки всех эксплуатационных характеристик.

Наиболее перспективными представляются составы, обеспечивающие оптимальное сочетание прочности, средней плотности и коэффициента теплопроводности.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что термообработанная опока является эффективным природным модифицирующим компонентом силикатной массы. В отличие от стеклопорошка, который преимущественно активизирует процессы гидротермального взаимодействия, опока оказывает комплексное структурно-физическое воздействие, обусловленное ее развитой пористой структурой и низкой средней плотностью.

Введение термообработанной опоки обеспечивает направленное снижение средней плотности и коэффициента теплопроводности при сохранении конструкционной прочности силикатного кирпича. Установленные закономерности позволяют рассматривать опоку как перспективное региональное сырье для получения конструкционно-теплоизоляционных автоклавных стеновых материалов нового поколения.

Анализ изменения эксплуатационных свойств позволил установить общие закономерности влияния термообработанной опоки на характеристики силикатного кирпича. Однако для научного объяснения выявленных зависимостей необходимо рассмотреть механизмы формирования внутреннего строения материала и особенности взаимодействия пористого кремнеземистого компонента с известково-песчаной системой в процессе автоклавного твердения. Эти вопросы подробно рассматриваются в следующем разделе.

6.5 Механизм структурообразования силикатного кирпича с использованием термообработанной опоки

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что влияние термообработанной опоки на свойства силикатного кирпича определяется не только изменением количественного соотношения компонентов силикатной массы, но и качественной перестройкой процессов формирования структуры материала на всех этапах его

получения. Установленные закономерности изменения средней плотности, прочности, теплопроводности, водопоглощения и морозостойкости указывают на комплексный характер воздействия пористого кремнеземистого компонента, сочетающего физические, структурные и химико-минералогические механизмы модифицирования.

В отличие от традиционного кварцевого песка, представляющего собой плотный инертный кремнеземистый материал, термообработанная опока обладает развитой системой внутренних пор, шероховатой поверхностью и значительно меньшей средней плотностью. Эти особенности определяют принципиально иной характер формирования структуры автоклавного силикатного камня.

Процесс структурообразования силикатного кирпича с использованием термообработанной опоки можно условно разделить на несколько взаимосвязанных стадий:

- формирование композиционной сырьевой системы;
- уплотнение структуры при полусухом прессовании;
- гидротермальное взаимодействие компонентов;
- образование цементирующей гидросиликатной матрицы;
- формирование рационального порового пространства;
- развитие комплекса эксплуатационных свойств.

Каждая из указанных стадий оказывает влияние на конечную структуру и свойства силикатного материала.

6.5.1 Формирование композиционной структуры сырьевой массы

На стадии приготовления силикатной смеси частицы термообработанной опоки равномерно распределяются в объеме традиционной известково-песчаной массы.

В отличие от плотных кварцевых зерен, частицы опоки характеризуются развитой внутренней пористостью и значительно меньшей объемной массой.

В результате уже на начальном этапе формируется неоднородная композиционная система, включающая:

- плотную известково-песчаную матрицу;
- легкие пористые зерна опоки;
- межзерновое пространство, заполняемое продуктами гидротермального твердения.

Именно такая неоднородность становится основой последующего формирования облегченной структуры силикатного кирпича.

Следует отметить, что при содержании опоки до 30 % сохраняется непрерывность минерального каркаса силикатной массы, благодаря чему

обеспечивается возможность получения конструкционного материала с нормативной прочностью.

6.5.2 Особенности формирования структуры при прессовании

При полусухом прессовании силикатной массы происходит уплотнение зернистой композиции и образование многочисленных контактов между частицами.

При использовании термообработанной опоки механизм уплотнения отличается от традиционной силикатной массы.

Пористые частицы обладают меньшей жесткостью и способны частично перераспределять локальные напряжения, возникающие при прессовании.

В результате формируется более сложная пространственная система контактов, включающая:

- контакты между зернами кварцевого песка;
- контакты между песком и опокой;
- контакты между отдельными зернами опоки;
- известково-кремнеземистые прослойки, соединяющие все компоненты композиции.

Именно такая пространственная организация обеспечивает сохранение целостности сырца до начала автоклавной обработки.

6.5.3 Формирование гидросиликатной матрицы

На стадии автоклавного твердения начинается интенсивное взаимодействие известкового компонента с кремнеземистой частью силикатной массы.

Основную роль в обеспечении прочности материала по-прежнему играет гидротермальное образование гидросиликатов кальция.

В присутствии термообработанной опоки данный процесс протекает в условиях более сложной пространственной организации системы.

Частицы опоки выполняют функцию своеобразного каркаса, вокруг которого развивается гидросиликатная матрица.

При этом продукты гидротермального твердения соединяют:

- зерна кварцевого песка;
- поверхность частиц опоки;
- межзерновое пространство силикатной композиции.

Следствием этого является образование единой пространственно связанной структуры, обеспечивающей сохранение конструкционной прочности даже при уменьшении средней плотности материала.

Следует подчеркнуть, что в настоящем исследовании механизм взаимодействия рассматривается на основании экспериментально установленных изменений свойств материала. Поскольку статья не

содержит результатов рентгенофазового анализа или электронной микроскопии, утверждения о конкретных кристаллических фазах ограничиваются общепринятыми представлениями о гидротермальном твердении силикатных материалов.

6.5.4 Формирование рациональной поровой структуры

Наиболее существенное влияние термообработанная опока оказывает на процессы формирования порового пространства силикатного кирпича.

В традиционном силикатном кирпиче пористость формируется главным образом за счет межзерновых пустот и структуры цементирующей гидросиликатной матрицы.

При введении термообработанной опоки к ним добавляется развитая система внутренних пор самого заполнителя.

Таким образом, структура материала приобретает многоуровневый характер.

В ней можно выделить:

- внутренние поры зерен опоки;
- межзерновые поры;
- микропоры гидросиликатной матрицы;
- переходные контактные зоны между компонентами.

Именно сочетание различных типов пор обеспечивает уменьшение средней плотности при сравнительно небольшом снижении прочности.

Кроме того, многочисленные мелкие воздушные полости препятствуют прямолинейному распространению теплового потока внутри материала.

Поэтому коэффициент теплопроводности уменьшается значительно быстрее, чем средняя плотность силикатного кирпича.

6.5.5 Механизм повышения энергоэффективности

Полученные экспериментальные результаты показывают, что снижение теплопроводности силикатного кирпича обусловлено несколькими взаимодополняющими механизмами.

Во-первых, уменьшается доля плотной минеральной фазы, обладающей высокой теплопроводностью.

Во-вторых, увеличивается объем воздуха, заключенного в порах термообработанной опоки.

В-третьих, возрастает извилистость путей распространения теплового потока.

В-четвертых, неоднородная композиционная структура увеличивает количество внутренних границ раздела фаз, дополнительно препятствующих передаче тепловой энергии.

Следовательно, формирование энергоэффективного силикатного кирпича связано не только с уменьшением массы материала, но и с принципиальным изменением внутренней архитектуры его структуры.

6.5.6 Авторская концептуальная модель структурообразования

На основании результатов проведенных исследований предлагается следующая концептуальная схема механизма формирования структуры силикатного кирпича с использованием термообработанной опоки (рис. 6.4)



Рисунок 6.4 – Концептуальная схема структурообразования силикатного кирпича с использованием термообработанной опоки

6.5.7 Научное значение установленных закономерностей

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что термообработанная опока является не просто облегчающим заполнителем, а многофункциональным природным кремнеземистым компонентом, одновременно влияющим на:

- плотность силикатной композиции;
- пространственную организацию порового пространства;
- процессы формирования цементирующей матрицы;
- теплофизические характеристики материала;

- эксплуатационные свойства силикатного кирпича.

По сравнению с традиционной известково-песчаной системой использование термообработанной опоки обеспечивает качественно иной механизм формирования структуры, основанный на сочетании природной пористости заполнителя и процессов гидротермального твердения. Именно эта особенность определяет перспективность применения опоки для получения конструкционно-теплоизоляционных силикатных материалов.

Таким образом, установленный механизм структурообразования расширяет научные представления о возможностях использования природных кремнеземистых пород в технологии автоклавных строительных материалов и дополняет общую концепцию настоящей монографии, в которой рассмотрены различные пути направленного управления структурой силикатного кирпича посредством вторичного и природного кремнеземсодержащего сырья.

Установленные механизмы структурообразования позволяют перейти от анализа отдельных свойств материала к их комплексной научной оценке. В следующем разделе будет выполнено обобщение роли термообработанной опоки как природного кремнеземистого модификатора и показано ее место среди других компонентов, рассмотренных в монографии (стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли), с формулированием научного значения данного направления исследований.

6.6 Научное значение применения термообработанной опоки в технологии энергоэффективного силикатного кирпича

Проведенные исследования позволяют рассматривать применение термообработанной опоки не только как частное технологическое решение, направленное на улучшение отдельных свойств силикатного кирпича, но и как самостоятельное научное направление развития технологии автоклавных строительных материалов. В отличие от традиционного подхода, основанного на использовании исключительно кварцевого песка в качестве кремнеземистого компонента, предложенная концепция предусматривает целенаправленное применение природной кремнеземистой породы с развитой пористой структурой для регулирования процессов формирования структуры и комплекса эксплуатационных свойств силикатного материала.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что термообработанная опока выполняет в составе силикатной массы одновременно несколько взаимосвязанных функций, сочетание которых ранее практически не рассматривалось в отечественной и зарубежной научной литературе применительно к технологии автоклавного силикатного кирпича. Прежде всего, опока выступает в качестве природного кремнеземсодержащего компонента, участвующего в

формировании силикатной композиции. Одновременно благодаря низкой средней плотности и развитой внутренней пористости она выполняет функции облегченного минерального заполнителя, регулирующего объемную структуру материала.

Важной особенностью исследуемой системы является то, что изменение эксплуатационных характеристик силикатного кирпича обусловлено не введением искусственных порообразующих веществ и не изменением режимов автоклавной обработки, а использованием природного сырья с заранее сформированной пористой структурой. Такой подход позволяет получать облегченные силикатные материалы без усложнения технологического процесса и без применения дополнительных химических модификаторов.

Научная ценность выполненных исследований заключается также в установлении закономерностей комплексного изменения эксплуатационных свойств силикатного кирпича при последовательном увеличении содержания термообработанной опоки. Экспериментально показано, что уменьшение средней плотности сопровождается снижением коэффициента теплопроводности, при этом прочность материала сохраняется на уровне, достаточном для использования изделий в качестве конструктивно-теплоизоляционного стенового материала. Установленная взаимосвязь между плотностью, пористой структурой и теплофизическими характеристиками расширяет современные представления о механизмах регулирования свойств автоклавных силикатных материалов.

Особый интерес представляет сопоставление результатов настоящей главы с исследованиями, изложенными в предыдущих главах монографии. Несмотря на различную природу исследуемых модифицирующих компонентов, все рассмотренные композиционные системы имеют единую научную цель — направленное управление структурой силикатного кирпича для повышения его энергоэффективности.

При этом каждый из исследованных компонентов реализует собственный механизм воздействия на материал:

- **стеклопорошок** обеспечивает преимущественно химическую активацию известково-кремнеземистой системы за счет высокой реакционной способности аморфного кремнезема;
- **зола-уноса** способствует комплексному алюмосиликатному модифицированию гидротермального структурообразования;
- **керамзитовая пыль** формирует облегченный композиционный материал благодаря сочетанию пористой структуры и алюмосиликатного состава;
- **термообработанная опока** реализует механизм природного микропористого кремнеземистого модифицирования, обеспечивая снижение средней плотности и теплопроводности за счет особенностей собственной структуры.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают существование нескольких самостоятельных путей управления структурообразованием силикатного кирпича, каждый из которых основан на использовании различных видов кремнеземистого сырья. В совокупности они формируют единую научную концепцию настоящей монографии, заключающуюся в направленном регулировании структуры и свойств автоклавных силикатных материалов посредством рационального использования природных и техногенных кремнеземсодержащих компонентов.

С научной точки зрения особенно важно, что использование термообработанной опоки расширяет традиционные представления о роли природного минерального сырья в технологии силикатного кирпича. Если ранее подобные материалы преимущественно рассматривались как заменители плотных заполнителей, то результаты настоящего исследования показывают возможность их применения в качестве функциональных компонентов, позволяющих одновременно регулировать среднюю плотность, теплопроводность, пористость и эксплуатационные характеристики материала.

Практическая значимость выполненных исследований определяется региональной направленностью разработки. В работе использована опока Таскалинского месторождения Западно-Казахстанской области, обладающая значительными промышленными запасами и благоприятными физическими характеристиками. Это создает реальные предпосылки для формирования региональной сырьевой базы производства энергоэффективных силикатных материалов и позволяет существенно расширить номенклатуру природного минерального сырья, применяемого предприятиями строительной индустрии Казахстана.

Полученные результаты имеют значение не только для технологии силикатного кирпича, но и для дальнейшего развития научных основ автоклавного строительного материаловедения. Установленные закономерности могут быть использованы при разработке новых видов стеновых материалов, легких автоклавных изделий, теплоизоляционных композиций и других строительных материалов, в которых требуется сочетание достаточной прочности и повышенной энергоэффективности.

Особое значение настоящего исследования состоит в том, что оно объединяет два стратегически важных направления современного строительного материаловедения. С одной стороны, показана возможность эффективного использования природных кремнеземистых пород Западного Казахстана. С другой стороны, результаты данной главы органично дополняют исследования по переработке стеклобоя, золы-уноса и керамзитовой пыли, рассмотренные в предыдущих главах. В результате формируется единая научная концепция комплексного использования

природного и техногенного кремнеземсодержащего сырья для создания энергоэффективных автоклавных строительных материалов.

Таким образом, исследования, представленные в настоящей главе, существенно расширяют научные представления о возможностях применения кремнеземистых пород в технологии силикатного кирпича и подтверждают перспективность использования термообработанной опоки как эффективного природного модифицирующего компонента, обеспечивающего получение конструкционно-теплоизоляционных автоклавных материалов нового поколения.

Выводы по главе 6

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы.

1. Научно обоснована возможность использования термообработанной опоки Таскалинского месторождения в качестве природного кремнеземистого компонента силикатной массы, обеспечивающего направленное регулирование структуры и свойств автоклавного силикатного кирпича.

2. Установлено, что последовательное увеличение содержания термообработанной опоки сопровождается закономерным снижением средней плотности силикатного кирпича с **1,76 до 1,52 г/см³** и коэффициента теплопроводности с **0,80 до 0,64 Вт/(м·К)** при сохранении конструкционной прочности на уровне **21,4–48,6 МПа**.

3. Установлено, что применение термообработанной опоки обеспечивает формирование облегченной композиционной структуры с развитым поровым пространством, способствующим повышению теплоизоляционных свойств силикатного кирпича.

4. Научно обосновано, что механизм действия термообработанной опоки отличается от механизмов, характерных для стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли, и определяется сочетанием природной микропористости, низкой средней плотности и кремнеземистого состава.

5. Разработаны экспериментальные составы силикатной массы с содержанием термообработанной опоки 10, 20 и 30 %, позволяющие получать конструкционно-теплоизоляционный силикатный кирпич с улучшенными теплофизическими характеристиками.

6. Показано, что использование опоки Таскалинского месторождения расширяет сырьевую базу предприятий силикатной промышленности Западного Казахстана и создает предпосылки для промышленного применения местного природного кремнеземистого сырья при производстве энергоэффективных стеновых материалов.

После рассмотрения четырех самостоятельных направлений модифицирования силикатной массы — стеклопорошком,

стеклопорошком совместно с золой-уноса, стеклопорошком совместно с керамзитовой пылью и термообработанной опокой — возникает необходимость их комплексного сопоставления. Каждая из исследованных композиционных систем обладает собственными особенностями структурообразования и оказывает различное влияние на физико-механические и теплофизические свойства силикатного кирпича.

ГЛАВА 7. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛИКАТНОЙ МАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

7.1 Научные предпосылки сравнительного анализа различных композиционных систем

Разработка энергоэффективных строительных материалов в настоящее время основывается на принципе целенаправленного управления процессами структурообразования посредством изменения состава сырьевой композиции. Современные исследования показывают, что повышение теплозащитных характеристик автоклавных силикатных материалов не может быть достигнуто исключительно за счет изменения одного технологического параметра. Необходим комплексный подход, предусматривающий регулирование химического состава, фазовых превращений, поровой структуры и морфологии материала с использованием различных видов природного и техногенного минерального сырья.

В предыдущих главах настоящей монографии были рассмотрены четыре самостоятельные композиционные системы, каждая из которых реализует собственный механизм воздействия на процессы гидротермального структурообразования силикатного кирпича.

Первая система основана на использовании тонкодисперсного стеклопорошка, полученного путем переработки стеклоотходов. Основным механизмом действия данного компонента заключается в повышенной реакционной способности аморфного кремнезема, который интенсифицирует процессы образования гидросиликатов кальция и способствует формированию более плотной и однородной цементирующей матрицы.

Вторая система предусматривает совместное применение стеклопорошка и золы-уноса. В данном случае процесс структурообразования определяется синергетическим взаимодействием аморфного кремнезема стекла и алюмосиликатной составляющей золы. Совместное влияние этих компонентов обеспечивает направленное изменение фазового состава, увеличение количества гидратных новообразований и формирование рациональной мелкопористой структуры.

Третья композиционная система основана на совместном использовании стеклопорошка и керамзитовой пыли. Основной особенностью данного направления является сочетание химически активного стеклопорошка с легким микропористым алюмосиликатным

материалом, что позволяет одновременно снижать среднюю плотность силикатного кирпича и сохранять его конструкционные свойства.

Четвертая система принципиально отличается от предыдущих использованием природной термообработанной опоки Таскалинского месторождения. В данном случае регулирование структуры материала достигается преимущественно за счет природной микропористости кремнеземистой породы и особенностей ее взаимодействия с известково-песчаной системой в процессе автоклавного твердения.

Несмотря на различную природу исследуемых компонентов, все рассмотренные системы объединяет единая научная цель — получение энергоэффективного силикатного кирпича путем направленного изменения структуры материала. Вместе с тем эффективность каждого способа модифицирования определяется различными механизмами, вследствие чего возникает необходимость их комплексного сравнительного анализа.

Следует отметить, что ранее большинство исследований было посвящено изучению отдельных видов модифицирующих добавок. При этом сравнительный анализ нескольких независимых композиционных систем, выполненный в рамках единой методологии, практически отсутствует. Это существенно затрудняет выбор наиболее рациональных решений для промышленного производства энергоэффективных силикатных материалов.

Настоящее исследование отличается тем, что все экспериментальные работы выполнены в рамках единой научной концепции с использованием сопоставимых методов подготовки сырья, приготовления силикатной массы, полусухого прессования, автоклавной обработки и оценки физико-механических и теплофизических свойств. Благодаря этому появляется возможность корректного сопоставления эффективности различных модифицирующих компонентов по единым критериям.

В качестве основных критериев сравнительного анализа приняты:

- средняя плотность силикатного кирпича;
- предел прочности при сжатии;
- коэффициент теплопроводности;
- водопоглощение;
- морозостойкость;
- особенности структурообразования;
- технологическая реализуемость;
- промышленная готовность;
- ресурсосберегающий эффект;
- экологическая эффективность.

Использование комплексной системы критериев позволяет оценить исследуемые композиции не только с позиций материаловедения, но и с

точки зрения их практической применимости в условиях действующего промышленного производства.

Особое внимание в настоящей главе уделено выявлению общих закономерностей формирования структуры силикатного кирпича при использовании различных видов кремнеземистого сырья. Это позволяет перейти от анализа отдельных экспериментальных результатов к формированию единой научной концепции управления свойствами автоклавных силикатных материалов.

Таким образом, цель настоящей главы заключается в сравнительном анализе эффективности различных способов модифицирования силикатной массы, установлении общих закономерностей изменения структуры и свойств силикатного кирпича, а также научном обосновании рациональных направлений использования природного и техногенного кремнеземсодержащего сырья при производстве энергоэффективных автоклавных строительных материалов.

Для проведения объективного сравнительного анализа необходимо прежде всего сопоставить исследованные композиционные системы по их составу, природе модифицирующих компонентов и предполагаемым механизмам воздействия на процессы структурообразования. Такое сопоставление позволяет сформировать единую методологическую основу последующего анализа физико-механических, теплофизических и эксплуатационных характеристик силикатного кирпича. С этой целью в следующем разделе приводится сравнительная характеристика всех исследованных композиционных систем и определяется их место в общей концепции направленного модифицирования силикатной массы.

7.2 Сравнительная характеристика исследованных композиционных систем

В предыдущих главах настоящей монографии рассмотрены четыре самостоятельных направления модифицирования силикатной массы, основанные на использовании различных видов природного и техногенного кремнеземсодержащего сырья. Несмотря на различную природу исследуемых компонентов, все разработанные композиционные системы имеют общую научную цель — направленное управление процессами гидротермального структурообразования для получения энергоэффективного силикатного кирпича с улучшенными физико-механическими и теплофизическими характеристиками.

Вместе с тем анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что каждый модифицирующий компонент реализует собственный механизм воздействия на структуру силикатного материала. Эти различия определяются происхождением сырья, его химико-минералогическим составом, морфологией частиц, степенью

дисперсности, внутренней пористостью и особенностями взаимодействия с известково-кремнеземистой системой в процессе автоклавного твердения.

Для объективной оценки эффективности исследованных направлений выполнено их комплексное сравнение по единой системе критериев, включающей происхождение модифицирующего компонента, механизм воздействия на структуру материала, влияние на основные эксплуатационные свойства и перспективы промышленного применения.

Переходной текст к таблице:

Для выявления общих и отличительных особенностей исследованных композиционных систем проведено их сопоставление по основным научным и технологическим признакам. Такое сравнение позволяет определить роль каждого модифицирующего компонента в процессах структурообразования силикатного кирпича и установить область его наиболее рационального применения. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Сравнительная характеристика исследованных композиционных систем

Критерий сравнения	Стеклопорошок	Стеклопорошок + зола-уноса	Стеклопорошок + керамзитовая пыль	Термообработанная опока
Вид сырья	Вторичное стекольное сырье	Вторичное сырье + техногенный отход	Вторичное сырье + керамический техногенный отход	Природная кремнеземистая порода
Основной механизм воздействия	Химическая активация	Комплексная химико-минералогическая активация	Химическая активация + структурное облегчение	Природное структурное облегчение
Основной эффект	Рост прочности	Снижение теплопроводности	Снижение плотности	Снижение плотности и теплопроводности
Основной регулируемый параметр	Гидросиликатная матрица	Фазообразование	Пористость	Микропористая структура
Источник эффекта	Аморфный SiO_2	Аморфный SiO_2 + алюмосиликаты	Аморфный SiO_2 + пористый алюмосиликат	Природная пористая кремнеземистая структура
Преимущество	Максимальная прочность	Максимальная энергоэффективность	Минимальная плотность	Использование местного природного сырья
Ограничение	Незначительное снижение плотности	Ограничение по прочности при высоких дозировках	Рост водопоглощения	Необходимость выбора рационального содержания

Как видно из таблицы 7.1, исследованные композиционные системы принципиально отличаются по механизму формирования структуры силикатного кирпича. Использование стеклопорошка представляет собой классический пример химического модифицирования известково-кремнеземистой системы. Благодаря высокой реакционной способности аморфного кремнезема стеклопорошок интенсифицирует процессы гидротермального взаимодействия и способствует образованию более плотной цементирующей гидросиликатной матрицы. Именно этим объясняется получение максимальных показателей прочности среди всех исследованных композиций.

При совместном использовании стеклопорошка и золы-уноса реализуется иной механизм. В данном случае повышение эффективности определяется не только активностью аморфного кремнезема, но и участием алюмосиликатной составляющей золы в процессах гидротермального фазообразования. В результате формируется более сложная композиционная система, обеспечивающая существенное снижение коэффициента теплопроводности при сохранении нормативной прочности.

Система «стеклопорошок — керамзитовая пыль» отличается тем, что наряду с химическим воздействием стеклопорошка существенную роль начинает играть физическое влияние пористого алюмосиликатного заполнителя. Именно сочетание этих факторов обеспечивает наиболее выраженное уменьшение средней плотности силикатного кирпича.

Наиболее самостоятельной с научной точки зрения является композиционная система на основе термообработанной опоки. В отличие от предыдущих вариантов она практически не использует преимущества вторичного техногенного сырья, а базируется на применении природной кремнеземистой породы с заранее сформированной микропористой структурой. Поэтому механизм формирования свойств материала определяется преимущественно структурно-физическими особенностями самого заполнителя.

Следует отметить, что различия между исследованными системами проявляются не только в механизмах структурообразования, но и в характере изменения эксплуатационных свойств.

Для более детального анализа эффективности каждого направления модифицирования выполнено сопоставление основных эксплуатационных характеристик разработанных силикатных композиций. При этом учитывались наиболее важные показатели, определяющие возможность практического применения энергоэффективного силикатного кирпича. Сравнительные результаты представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Основные преимущества различных способов модифицирования силикатной массы

Композиционная система	Главный научный результат	Основное преимущество	Наиболее перспективная область применения
Стеклопорошок	Активация гидротермального структурообразования	Высокая прочность	Конструкционный силикатный кирпич
Стеклопорошок + зола-уноса	Комплексное химико-минералогическое модифицирование	Минимальная теплопроводность	Энергоэффективные наружные стены
Стеклопорошок + керамзитовая пыль	Совместное структурное облегчение	Минимальная плотность	Облегченные стеновые материалы
Термообработанная опока	Использование природной микропористой кремнеземистой породы	Региональная сырьевая база и энергоэффективность	Конструкционно-теплоизоляционный кирпич

Анализ представленных данных показывает, что среди исследованных направлений отсутствует универсальная композиционная система, одинаково превосходящая остальные по всем показателям. Каждая из них обладает собственной областью рационального применения.

Стеклопорошок обеспечивает максимальный прирост прочности и наиболее эффективен при производстве конструкционных силикатных изделий. Совместное использование стеклопорошка и золы-уноса позволяет получить материалы с наиболее низкой теплопроводностью, что делает данную систему перспективной для энергоэффективного строительства. Композиция со стеклопорошком и керамзитовой пылью отличается наиболее выраженным снижением средней плотности и может быть рекомендована для производства облегченных стеновых изделий. Термообработанная опока представляет особый интерес благодаря использованию местного природного сырья и возможности создания конструкционно-теплоизоляционного силикатного кирпича с улучшенными теплофизическими характеристиками.

Таким образом, сравнительный анализ показывает, что исследованные композиционные системы не конкурируют между собой, а взаимно дополняют друг друга, формируя научную основу для создания широкой номенклатуры энергоэффективных автоклавных строительных материалов с заранее прогнозируемыми эксплуатационными свойствами.

Проведенный сравнительный анализ впервые в рамках единого исследования позволил сопоставить четыре различных направления модифицирования силикатной массы по единым научным и технологическим критериям. Установлено, что эффективность каждой композиционной системы определяется различным механизмом структурообразования: химической активацией (стеклопорошок),

комплексным химико-минералогическим взаимодействием (стеклопорошок и зола-уноса), структурным облегчением (стеклопорошок и керамзитовая пыль) и природным микропористым модифицированием (термообработанная опока). Совокупность этих результатов формирует единую научную концепцию направленного управления структурой автоклавных силикатных материалов посредством рационального использования вторичного и природного кремнеземсодержащего сырья.

Установленные различия в механизмах модифицирования позволяют перейти к количественной оценке эффективности исследованных композиций. В следующем разделе будет выполнен сравнительный анализ изменения средней плотности силикатного кирпича под влиянием различных модифицирующих компонентов, что позволит определить наиболее эффективные способы получения облегченных энергоэффективных автоклавных материалов.

7.3 Сравнительный анализ влияния различных модифицирующих компонентов на среднюю плотность силикатного кирпича

Средняя плотность является одной из основных характеристик автоклавных силикатных материалов, определяющих массу строительных конструкций, нагрузку на несущие элементы зданий, теплофизические свойства стеновых изделий и эффективность использования минерального сырья. Для энергоэффективных стеновых материалов снижение средней плотности представляет собой одну из важнейших научно-технических задач, поскольку именно данный показатель во многом определяет возможность уменьшения коэффициента теплопроводности без существенного ухудшения механических свойств материала.

В настоящем исследовании влияние различных модифицирующих компонентов на среднюю плотность силикатного кирпича изучалось в рамках четырех самостоятельных композиционных систем, каждая из которых реализует собственный механизм структурообразования.

При этом изменение средней плотности обусловлено различными физико-химическими процессами.

Для стеклопорошка основным фактором является изменение характера формирования гидросиликатной матрицы.

При использовании золы-уноса дополнительное влияние оказывает присутствие алюмосиликатной составляющей и изменение гранулометрической структуры силикатной массы.

В системе со стеклопорошком и керамзитовой пылью снижение средней плотности определяется сочетанием химического модифицирования и использованием легкого пористого алюмосиликатного компонента.

В композициях с термообработанной опокой основной эффект достигается благодаря природной микропористой структуре кремнеземистой породы и ее значительно меньшей средней плотности по сравнению с традиционной силикатной массой.

Переходной текст к таблице:

Для объективного сопоставления эффективности исследованных композиционных систем выполнен сравнительный анализ изменения средней плотности силикатного кирпича. В таблице 7.3 представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований, полученные в предыдущих главах монографии.

Таблица 7.3 – Влияние различных модифицирующих компонентов на среднюю плотность силикатного кирпича

Композиционная система	Средняя плотность контрольного состава, кг/м ³	Средняя плотность модифицированного состава, кг/м ³	Максимальное снижение, %
Стеклопорошок	1910–1950	1815–1820	6–7
Стеклопорошок + зола-уноса	1910–1950	1650–1700	13–15
Стеклопорошок + керамзитовая пыль	1800	1690	6
Термообработанная опока	1760	1520	13,6

Как видно из таблицы 7.3, все исследованные способы модифицирования обеспечивают снижение средней плотности силикатного кирпича, однако степень данного эффекта существенно различается.

Наименьшее изменение средней плотности наблюдается при использовании только стеклопорошка. Это закономерно, поскольку стеклопорошок имеет сравнительно высокую истинную плотность и оказывает влияние преимущественно на процессы гидротермального структурообразования, а не на объемную структуру материала.

Более выраженное снижение средней плотности достигается при совместном использовании стеклопорошка и золы-уноса. Помимо химической активности стеклопорошка существенную роль играет изменение характера упаковки частиц силикатной массы, а также присутствие полых и менее плотных алюмосиликатных частиц золы.

Высокую эффективность демонстрирует композиционная система со стеклопорошком и керамзитовой пылью. Использование предварительно обожженного микропористого алюмосиликатного материала обеспечивает

снижение средней плотности без критического ухудшения прочностных характеристик.

Наиболее значительное уменьшение средней плотности получено при использовании термообработанной опоки. Это объясняется тем, что снижение плотности обусловлено не только изменением структуры гидросиликатной матрицы, но и первоначально низкой плотностью самого природного заполнителя, обладающего развитой внутренней пористостью.

Следует отметить, что абсолютное уменьшение средней плотности не всегда является достаточным критерием оценки эффективности композиционной системы. Для строительных материалов важна не минимальная плотность сама по себе, а достижение оптимального сочетания между облегчением конструкции, механической прочностью и теплоизоляционными характеристиками.

Именно поэтому анализ средней плотности должен рассматриваться совместно с результатами определения прочности и коэффициента теплопроводности, которые будут представлены в последующих разделах настоящей главы.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что снижение средней плотности силикатного кирпича может быть достигнуто различными путями, однако эффективность каждого из них определяется природой используемого модифицирующего компонента. Стеклопорошок преимущественно изменяет процессы гидротермального структурообразования и обеспечивает умеренное облегчение материала. Совместное применение стеклопорошка с золой-уноса или керамзитовой пылью усиливает данный эффект благодаря дополнительному влиянию алюмосиликатных компонентов на формирование пористой структуры. Наиболее выраженное снижение средней плотности обеспечивает термообработанная опока, поскольку в этом случае структурное облегчение достигается за счет сочетания природной микропористости заполнителя и особенностей формирования силикатной матрицы. Полученные закономерности свидетельствуют, что регулирование средней плотности является одним из основных инструментов направленного управления эксплуатационными свойствами энергоэффективного силикатного кирпича.

Снижение средней плотности является лишь одной из составляющих повышения энергоэффективности силикатного кирпича. Не менее важным критерием является изменение коэффициента теплопроводности, который непосредственно определяет теплозащитные свойства стенового материала. Поэтому в следующем разделе проводится сравнительный анализ влияния различных модифицирующих компонентов на теплопроводность силикатного кирпича с установлением взаимосвязи между плотностью, пористой структурой и способностью материала препятствовать передаче тепловой энергии.

7.4 Сравнительный анализ влияния различных модифицирующих компонентов на коэффициент теплопроводности силикатного кирпича

Одним из важнейших критериев эффективности современных стеновых материалов является коэффициент теплопроводности, определяющий способность материала препятствовать передаче тепловой энергии через ограждающие конструкции зданий. В условиях резко континентального климата Республики Казахстан снижение теплопроводности стеновых материалов непосредственно связано с уменьшением тепловых потерь зданий, повышением их энергетической эффективности и сокращением эксплуатационных затрат на отопление.

Повышение теплозащитных характеристик силикатного кирпича является одной из центральных задач настоящего исследования. В отличие от традиционного силикатного кирпича, обладающего сравнительно высокой средней плотностью и коэффициентом теплопроводности, разработанные композиционные системы ориентированы на формирование структуры, обеспечивающей снижение интенсивности теплопередачи при сохранении конструкционной прочности.

Следует отметить, что уменьшение коэффициента теплопроводности достигается в исследованных композициях различными путями.

При использовании стеклопорошка снижение теплопроводности обусловлено главным образом совершенствованием структуры гидросиликатной матрицы и более равномерным распределением микропор.

В композициях со стеклопорошком и золой-уноса дополнительный эффект обеспечивается совместным влиянием аморфного кремнезема и алюмосиликатных компонентов на процессы формирования структуры силикатного камня.

Для системы со стеклопорошком и керамзитовой пылью определяющую роль играет наличие пористого алюмосиликатного заполнителя, обладающего низкой собственной теплопроводностью.

В композициях с термообработанной опокой снижение теплопроводности связано прежде всего с природной микропористостью кремнеземистой породы и уменьшением средней плотности материала.

Таким образом, несмотря на различие механизмов структурообразования, все исследованные композиционные системы направлены на решение единой научной задачи — повышение теплоизоляционной эффективности силикатного кирпича.

Для объективного сопоставления теплофизической эффективности разработанных композиционных систем выполнен сравнительный анализ коэффициентов теплопроводности, полученных в ходе экспериментальных исследований. Результаты обобщения приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Сравнительный анализ влияния различных модифицирующих компонентов на коэффициент теплопроводности силикатного кирпича

Композиционная система	Коэффициент теплопроводности контрольного состава, Вт/(м·К)	Коэффициент теплопроводности модифицированного состава, Вт/(м·К)	Снижение, %
Стеклопорошок	0,88–0,91	0,69–0,70	22
Стеклопорошок + зола-уноса	0,88–0,91	0,52–0,54	40
Стеклопорошок + керамзитовая пыль	0,87	0,56	36
Термообработанная опока	0,80	0,64	20

Как видно из таблицы 7.4, все исследованные композиционные системы обеспечивают снижение коэффициента теплопроводности по сравнению с традиционным силикатным кирпичом.

Наименее выраженный эффект получен при использовании термообработанной опоки. Несмотря на заметное уменьшение теплопроводности, величина эффекта определяется главным образом снижением средней плотности материала вследствие использования природного пористого заполнителя.

Применение только стеклопорошка обеспечивает более существенное уменьшение коэффициента теплопроводности. Это свидетельствует о том, что изменение структуры гидросиликатной матрицы оказывает более значительное влияние на перенос тепловой энергии, чем простое снижение плотности материала.

Наиболее эффективными оказались композиционные системы, основанные на комплексном использовании стеклопорошка с техногенными алюмосиликатными компонентами.

Совместное применение стеклопорошка и керамзитовой пыли позволило снизить коэффициент теплопроводности до 0,56 Вт/(м·К), что примерно на 36 % ниже контрольного значения.

Максимальный эффект достигнут при использовании композиции «стеклопорошок — зола-уноса». В данном случае коэффициент теплопроводности уменьшился до 0,52–0,54 Вт/(м·К), что соответствует снижению приблизительно на 40 % относительно традиционного силикатного кирпича.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наиболее высокая теплоизоляционная эффективность достигается не при использовании одного модифицирующего компонента, а при их рациональном сочетании.

Особенно важно отметить, что снижение коэффициента теплопроводности происходит быстрее, чем уменьшение средней плотности материала.

Например:

- в системе «стеклопорошок» снижение плотности составило около 6–7 %, тогда как теплопроводность уменьшилась примерно на 22 %;
- в системе «стеклопорошок + зола-уноса» уменьшение плотности составило около 13–15 %, а теплопроводности — около 40 %;
- в системе «термообработанная опока» снижение плотности составило приблизительно 13,6 %, тогда как теплопроводность уменьшилась примерно на 20 %.

Данная закономерность свидетельствует, что теплопроводность определяется не только количеством пор, но и особенностями их пространственного распределения, формой, размерами, степенью замкнутости и характером связи с гидросиликатной матрицей.

Анализ выявленных закономерностей

Сравнительный анализ позволяет выделить четыре различных механизма повышения энергоэффективности силикатного кирпича.

Первый механизм реализуется при использовании стеклопорошка и связан преимущественно с совершенствованием структуры цементирующей гидросиликатной матрицы.

Второй механизм характерен для системы «стеклопорошок — зола-уноса» и определяется совместным действием химической активации и алюмосиликатного модифицирования.

Третий механизм реализуется при использовании керамзитовой пыли, где существенную роль играет собственная микропористость легкого алюмосиликатного материала.

Четвертый механизм связан с применением термообработанной опоки и обусловлен природной пористой структурой кремнеземистой породы.

Таким образом, несмотря на единый конечный результат — снижение коэффициента теплопроводности, физическая природа данного эффекта в каждой композиционной системе различна.

Выполненный сравнительный анализ показывает, что эффективность повышения энергоэффективности силикатного кирпича определяется не только видом используемого кремнеземистого сырья, но и механизмом его участия в формировании структуры автоклавного материала. Наиболее выраженное снижение коэффициента теплопроводности достигается при комплексном использовании стеклопорошка с алюмосиликатными техногенными компонентами, обеспечивающими синергетическое изменение фазового состава и поровой структуры. Термообработанная опока реализует иной механизм, основанный преимущественно на

использовании природной микропористости. Полученные закономерности свидетельствуют, что направленное управление структурой силикатного кирпича позволяет создавать материалы с заранее заданными теплофизическими характеристиками в зависимости от функционального назначения изделий.

Средняя плотность и коэффициент теплопроводности являются основными показателями энергоэффективности силикатного кирпича. Однако практическое применение разработанных материалов невозможно без обеспечения требуемой механической прочности. Поэтому следующим этапом сравнительного анализа является исследование влияния различных модифицирующих компонентов на прочностные характеристики силикатного кирпича и определение рационального соотношения между снижением плотности, уменьшением теплопроводности и сохранением конструкционной надежности материала.

7.5 Сравнительный анализ прочностных характеристик модифицированного силикатного кирпича

Предел прочности при сжатии является основным показателем, определяющим возможность применения силикатного кирпича в качестве конструкционного стенового материала. Именно прочность характеризует способность изделия воспринимать эксплуатационные нагрузки, обеспечивает надежность каменной кладки и во многом определяет область практического использования силикатного кирпича.

В традиционной технологии производства силикатного кирпича повышение прочности достигается главным образом за счет формирования плотной гидросиликатной матрицы и минимизации общей пористости материала. Вместе с тем одной из основных задач настоящего исследования являлось создание энергоэффективного силикатного кирпича с пониженной средней плотностью и теплопроводностью. Очевидно, что уменьшение плотности практически всегда сопровождается определенным снижением механической прочности. Поэтому научной задачей являлось не достижение максимально возможной прочности, а установление рационального соотношения между конструкционной надежностью и теплоизоляционной эффективностью материала.

Результаты исследований, представленные в предыдущих главах монографии, свидетельствуют о том, что различные модифицирующие компоненты оказывают неодинаковое влияние на процессы формирования прочности автоклавного силикатного кирпича. Эти различия обусловлены особенностями химического состава, морфологии частиц, степенью их участия в гидротермальном взаимодействии и характером формируемой структуры.

Для количественной оценки влияния исследованных композиционных систем на прочность силикатного кирпича выполнено сопоставление результатов экспериментальных исследований, проведенных в главах 3–6. Обобщенные данные представлены в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Сравнительный анализ прочностных характеристик силикатного кирпича

Композиционная система	Прочность контрольного состава, МПа	Прочность модифицированного состава, МПа	Характер изменения
Стеклопорошок	18–19	16–18,5	Практически сохраняется
Стеклопорошок + зола-уноса	15–16*	17–18*	Повышается за счет комплексного структурообразования
Стеклопорошок + керамзитовая пыль	47,8	30,3	Закономерное снижение при сохранении конструкционной прочности
Термообработанная опока	48,6	21,4	Постепенное снижение при увеличении содержания опоки

Как следует из таблицы 7.5, характер изменения прочности существенно зависит от механизма действия модифицирующего компонента.

Наиболее стабильные прочностные показатели получены при использовании стеклопорошка. Даже при замене части традиционной силикатной массы прочность материала практически сохраняется на уровне контрольного состава. Это подтверждает, что аморфный кремнезем стеклопорошка эффективно участвует в процессах гидротермального структурообразования и компенсирует возможное снижение прочности вследствие изменения состава сырьевой смеси.

Композиционная система «стеклопорошок – зола-уноса» демонстрирует способность поддерживать, а в ряде составов и повышать прочностные характеристики благодаря совместному действию стеклопорошка и алюмосиликатной составляющей золы. Такой результат подтверждает эффективность комплексного химико-минералогического модифицирования автоклавной системы.

Введение керамзитовой пыли сопровождается более заметным снижением прочности. Это обусловлено тем, что пористые частицы керамзитовой пыли обладают меньшей собственной прочностью по сравнению с кварцевым песком. Однако даже при максимальном содержании добавки прочность остается достаточной для использования

материала в качестве конструкционно-теплоизоляционного силикатного кирпича.

Аналогичная закономерность наблюдается при использовании термообработанной опоки. По мере увеличения содержания опоки прочность постепенно уменьшается. Вместе с тем даже при максимальной дозировке полученные значения значительно превышают нормативные требования, предъявляемые к большинству марок силикатного кирпича, что подтверждает возможность практического применения разработанных составов.

Следует подчеркнуть, что снижение прочности в системах с керамзитовой пылью и опокой не следует рассматривать как отрицательный результат. Оно является закономерным следствием формирования облегченной пористой структуры, которая обеспечивает существенное улучшение теплоизоляционных характеристик материала. Следовательно, уменьшение прочности сопровождается приобретением новых функциональных свойств, связанных с повышением энергоэффективности.

Анализ закономерностей формирования прочности

Сопоставление экспериментальных результатов позволяет выделить четыре основных механизма формирования прочности.

Первый механизм характерен для стеклопорошка и определяется химической активацией процессов гидротермального взаимодействия, что способствует образованию более совершенной гидросиликатной матрицы.

Второй механизм реализуется в системе «стеклопорошок – зола-уноса» и связан с совместным участием аморфного кремнезема и алюмосиликатных компонентов в формировании структуры силикатного камня.

Третий механизм наблюдается при использовании керамзитовой пыли. Здесь прочность определяется не только свойствами гидросиликатной матрицы, но и механическими характеристиками легкого пористого заполнителя.

Четвертый механизм характерен для термообработанной опоки. В этом случае снижение прочности обусловлено увеличением объема пористой фазы, однако благодаря эффективному сцеплению опоки с цементирующей матрицей материал сохраняет необходимый уровень конструкционной надежности.

Полученные закономерности свидетельствуют, что прочность силикатного кирпича определяется не только количеством пор, но и качеством их распределения, характером контактных зон между компонентами и совершенством сформированной гидросиликатной структуры.

Проведенный сравнительный анализ показал, что различные способы модифицирования силикатной массы по-разному влияют на формирование прочности автоклавного материала. Стеклопорошок и композиция «стеклопорошок – зола-уноса» обеспечивают наиболее эффективное сохранение или повышение прочности за счет химической активации процессов гидротермального структурообразования. Композиции с керамзитовой пылью и термообработанной опокой сопровождаются закономерным снижением прочности, обусловленным формированием облегченной пористой структуры. Однако достигнутые значения остаются достаточными для практического применения материала. Таким образом, результаты исследования подтверждают, что при разработке энергоэффективного силикатного кирпича критерием оптимизации должна служить не максимальная прочность сама по себе, а рациональное сочетание прочности, средней плотности и коэффициента теплопроводности, обеспечивающее требуемые эксплуатационные характеристики материала.

Средняя плотность, коэффициент теплопроводности и прочность являются основными показателями эффективности модифицированных силикатных композиций. Однако долговечность стеновых материалов определяется также их способностью сохранять свойства при увлажнении и многократном замораживании. Поэтому в следующем разделе проводится сравнительный анализ водопоглощения и морозостойкости силикатного кирпича, что позволит комплексно оценить эксплуатационную надежность разработанных композиционных систем и определить их перспективность для применения в климатических условиях Республики Казахстан.

7.6 Сравнительный анализ водопоглощения и морозостойкости модифицированного силикатного кирпича

Одними из важнейших эксплуатационных характеристик стеновых материалов являются водопоглощение и морозостойкость, определяющие долговечность конструкций в условиях переменного увлажнения, отрицательных температур и многократных циклов замораживания и оттаивания. Для силикатного кирпича эти показатели имеют особое значение, поскольку его структура формируется в результате гидротермального твердения и характеризуется развитой системой капиллярных и микропор.

Введение различных модифицирующих компонентов неизбежно изменяет поровую структуру материала. С одной стороны, развитие пористости способствует снижению средней плотности и коэффициента теплопроводности, с другой — может приводить к увеличению водопоглощения и снижению долговечности. Поэтому при разработке

энергоэффективного силикатного кирпича принципиально важно обеспечить рациональный баланс между улучшением теплофизических свойств и сохранением эксплуатационной надежности.

Выполненные исследования показали, что изменение водопоглощения и морозостойкости зависит не только от общего объема пор, но и от их размеров, формы, степени взаимосвязанности и характера распределения в структуре силикатного камня. Именно поэтому композиции с одинаковой средней плотностью могут существенно различаться по эксплуатационной стойкости.

Для комплексной оценки эксплуатационной надежности разработанных композиционных систем выполнено сопоставление результатов определения водопоглощения и морозостойкости силикатного кирпича. Обобщенные данные приведены в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Сравнительная характеристика водопоглощения и морозостойкости исследованных композиционных систем

Композиционная система	Водопоглощение, %	Морозостойкость	Общая эксплуатационная оценка
Стеклопорошок	18,3–20,5	F27–F35	Высокая
Стеклопорошок + зола-уноса	В пределах нормативных требований*	Соответствует нормативным требованиям*	Высокая
Стеклопорошок + керамзитовая пыль	15,2–20,2	Соответствует требованиям	Высокая
Термообработанная опока	17,95–25,15	F35–F50	Высокая при рациональном содержании опоки

Как видно из таблицы 7.6, введение всех исследованных модифицирующих компонентов сопровождается определенным изменением водопоглощения. Наиболее выраженный рост данного показателя наблюдается в композициях, содержащих пористые минеральные компоненты — керамзитовую пыль и термообработанную опоку. Это объясняется увеличением общего объема открытых пор и капилляров, способных поглощать воду.

Вместе с тем увеличение водопоглощения нельзя рассматривать как исключительно отрицательное явление. При рациональной организации порового пространства часть пор выполняет функцию компенсационных объемов, снижающих внутренние напряжения при замерзании воды. Благодаря этому материал способен сохранять достаточно высокую морозостойкость даже при повышенном водопоглощении.

Наиболее наглядно данная закономерность проявилась в системе с термообработанной опокой. Несмотря на увеличение водопоглощения до 25,15 %, морозостойкость опытных образцов составила F35–F50, что подтверждает эффективность сформированной поровой структуры и возможность практического применения разработанного материала. Аналогичная тенденция наблюдается и при использовании стеклопорошка совместно с керамзитовой пылью, где повышение пористости сопровождается сохранением эксплуатационной стойкости изделий.

Особый интерес представляет композиционная система на основе стеклопорошка. Благодаря более равномерной структуре гидросиликатной матрицы увеличение водопоглощения остается относительно небольшим, а морозостойкость сохраняется на уровне, соответствующем требованиям к силикатному кирпичу. Это подтверждает, что химическая активация процессов гидротермального твердения способствует не только повышению прочности, но и улучшению структуры материала с точки зрения его долговечности

Анализ взаимосвязи водопоглощения и морозостойкости

Результаты проведенного сравнительного анализа позволяют сделать важный вывод: между водопоглощением и морозостойкостью отсутствует простая линейная зависимость. Само по себе увеличение количества поглощаемой воды не всегда приводит к снижению морозостойкости. Решающее значение имеет характер порового пространства.

Если структура материала содержит преимущественно мелкие равномерно распределенные поры, способные выполнять функцию резервных объемов для расширяющейся при замерзании воды, морозостойкость может сохраняться на высоком уровне даже при относительно большом водопоглощении.

Напротив, наличие крупных взаимосвязанных капилляров приводит к концентрации внутренних напряжений и ускоренному разрушению материала при циклическом замораживании.

Таким образом, долговечность силикатного кирпича определяется не столько количеством пор, сколько их морфологией и пространственной организацией. Это положение полностью согласуется с результатами предыдущих глав монографии, где показано, что каждый модифицирующий компонент формирует собственный тип поровой структуры.

Проведенный сравнительный анализ показал, что повышение энергоэффективности силикатного кирпича неизбежно сопровождается изменением характеристик водопоглощения и морозостойкости. Однако рациональный выбор состава позволяет сформировать такую структуру материала, при которой увеличение пористости не приводит к ухудшению эксплуатационной надежности. Установлено, что стеклопорошок

способствует формированию более однородной гидросиликатной матрицы, совместное применение стеклопорошка с золой-уноса и керамзитовой пылью обеспечивает развитие рациональной мелкопористой структуры, а термообработанная опока создает систему природных микропор, эффективно повышающих теплоизоляционные свойства без критического снижения морозостойкости. Следовательно, долговечность энергоэффективного силикатного кирпича определяется качеством сформированной структуры, а не только величиной общей пористости.

Комплексный анализ средней плотности, теплопроводности, прочности, водопоглощения и морозостойкости позволяет перейти к завершающему этапу сравнительного исследования — многокритериальной оценке эффективности разработанных композиционных систем. В следующем разделе будет выполнен интегральный анализ всех исследованных составов, определены их рациональные области применения и сформулированы научные принципы выбора оптимальных технологий производства энергоэффективного силикатного кирпича.

7.7 Комплексная оценка эффективности исследованных композиционных систем и выбор рациональных составов

Проведенные исследования показали, что применение различных видов природного и техногенного кремнеземсодержащего сырья позволяет целенаправленно изменять структуру и свойства силикатного кирпича. Вместе с тем результаты сравнительного анализа свидетельствуют, что ни одна из разработанных композиционных систем не обладает абсолютным преимуществом одновременно по всем эксплуатационным показателям. Повышение одних характеристик, как правило, сопровождается изменением других свойств, что обусловлено сложностью процессов гидротермального структурообразования и взаимосвязью физико-механических и теплофизических характеристик материала.

В связи с этим выбор рационального состава должен основываться не на максимальном значении отдельного показателя, а на комплексной оценке совокупности эксплуатационных свойств с учетом функционального назначения силикатного кирпича.

В настоящем исследовании в качестве основных критериев эффективности приняты:

- средняя плотность;
- коэффициент теплопроводности;
- предел прочности при сжатии;
- водопоглощение;
- морозостойкость;
- технологическая реализуемость;

- экологическая эффективность;
- возможность промышленного внедрения.

Такой подход позволяет перейти от оценки отдельных экспериментальных результатов к научно обоснованному выбору композиционных систем для различных условий эксплуатации.

Переходной текст к таблице

Для интегральной оценки результатов исследований выполнено комплексное сопоставление разработанных композиционных систем по совокупности основных критериев эффективности. Это позволяет определить сильные стороны каждого направления модифицирования и установить наиболее рациональные области их промышленного применения. Результаты анализа представлены в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Комплексная сравнительная оценка исследованных композиционных систем

Критерий оценки	Стеклопорошок	Стеклопорошок + зола-уноса	Стеклопорошок + керамзитовая пыль	Термообработанная опока
Повышение прочности	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
Снижение средней плотности	★★★☆☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
Снижение теплопроводности	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆
Морозостойкость	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
Экологическая эффективность	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Использование местного сырья	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
Простота внедрения	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
Наиболее рациональная область применения	Конструкционный кирпич	Энергоэффективный кирпич	Облегченный кирпич	Конструкционно-теплоизоляционный кирпич

Как следует из таблицы 7.7, каждая из исследованных композиционных систем имеет собственную область рационального применения.

Использование стеклопорошка является наиболее эффективным при необходимости сохранения высокой прочности силикатного кирпича. Благодаря химической активации процессов гидротермального твердения данный компонент обеспечивает получение конструкционных стеновых

материалов с улучшенной структурой гидросиликатной матрицы без существенного изменения традиционной технологии производства.

Совместное применение стеклопорошка и золы-уноса демонстрирует наилучшие результаты с точки зрения повышения энергоэффективности. Именно эта композиционная система обеспечивает наиболее выраженное снижение коэффициента теплопроводности, что делает ее перспективной для производства наружных стеновых материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях холодного климата.

Композиция «стеклопорошок – керамзитовая пыль» позволяет получить облегченный силикатный кирпич при сохранении достаточного уровня конструкционной прочности. Такое сочетание свойств делает данную систему перспективной для изготовления стеновых изделий с уменьшенной массой, позволяющих снижать нагрузку на несущие конструкции зданий.

Использование термообработанной опоки занимает особое место среди исследованных направлений. В отличие от других композиций, основанных преимущественно на применении вторичного и техногенного сырья, данная система использует природную кремнеземистую породу местного происхождения. Это позволяет одновременно решить задачи расширения региональной сырьевой базы, повышения энергоэффективности силикатного кирпича и рационального использования природных ресурсов Западного Казахстана.

Следует подчеркнуть, что выбор оптимальной композиции определяется не только эксплуатационными требованиями, но и производственными условиями конкретного предприятия, доступностью сырья, экономическими факторами и региональными особенностями.

Научная концепция рационального выбора композиционных систем

На основании выполненного сравнительного анализа предлагается концепция рационального выбора модифицирующих компонентов в зависимости от приоритетных требований к готовой продукции.

Если основной задачей является получение **максимальной прочности**, наиболее целесообразно использовать стеклопорошок как химически активный кремнеземистый компонент.

При необходимости получения максимальной энергоэффективности наиболее рациональной является композиция «стеклопорошок – зола-уноса», обеспечивающая наименьший коэффициент теплопроводности.

Если приоритетом является уменьшение массы изделий, следует применять композицию со стеклопорошком и керамзитовой пылью.

Для производства конструкционно-теплоизоляционного силикатного кирпича с использованием региональной сырьевой базы наиболее перспективной является термообработанная опока.

Таким образом, разработанные композиционные системы не являются взаимозаменяемыми, а представляют собой специализированные технологические решения, предназначенные для различных направлений развития силикатной промышленности.

Выполненные исследования позволяют сформулировать обобщенную концепцию направленного управления свойствами силикатного кирпича посредством выбора различных модифицирующих компонентов. В отличие от традиционного подхода, ориентированного на применение единственного вида кремнеземистого сырья, разработанная концепция предусматривает использование нескольких самостоятельных путей регулирования процессов структурообразования в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик материала. Обобщенная схема представлена на рисунке 7.5.



Рисунок 7.5 – Концепция выбора рациональной композиционной системы в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств силикатного кирпича

Выполненный сравнительный анализ впервые позволил в рамках единого исследования сопоставить четыре различных направления модифицирования силикатной массы по совокупности физико-механических, теплофизических, эксплуатационных, технологических и экологических критериев. Установлено, что выбор рационального состава должен осуществляться на основе многокритериального подхода, учитывающего функциональное назначение материала, а не по одному отдельно взятому показателю.

Полученные результаты позволяют сформулировать новую научную концепцию направленного проектирования структуры силикатного кирпича, основанную на выборе модифицирующего компонента в зависимости от требуемого комплекса эксплуатационных свойств. Эта

концепция объединяет результаты всех выполненных исследований в единую систему знаний и расширяет научные основы технологии автоклавных силикатных материалов.

Комплексная оценка эффективности исследованных композиционных систем позволила определить рациональные составы силикатной массы и обосновать перспективность их промышленного применения.

Выводы по главе 7

Проведенный сравнительный анализ различных способов модифицирования силикатной массы позволил установить общие закономерности формирования структуры и свойств энергоэффективного силикатного кирпича, а также определить рациональные области применения исследованных композиционных систем.

По результатам выполненных исследований сформулированы следующие выводы.

1. Впервые в рамках единого исследования выполнен комплексный сравнительный анализ четырех самостоятельных направлений модифицирования силикатной массы — стеклопорошком, стеклопорошком совместно с золой-уноса, стеклопорошком совместно с керамзитовой пылью и термообработанной опокой, что позволило сформировать единую научную концепцию направленного управления процессами структурообразования автоклавного силикатного кирпича.

2. Установлено, что исследованные композиционные системы реализуют различные механизмы формирования структуры материала. Стеклопорошок обеспечивает преимущественно химическую активацию гидротермального взаимодействия; совместное применение стеклопорошка и золы-уноса приводит к комплексному химико-минералогическому модифицированию; композиция со стеклопорошком и керамзитовой пылью способствует структурному облегчению силикатной массы; использование термообработанной опоки основано на эффекте природного микропористого кремнеземистого модифицирования.

3. Установлено, что снижение средней плотности силикатного кирпича определяется не только количеством вводимого модифицирующего компонента, но и особенностями его внутренней структуры. Наиболее выраженное уменьшение средней плотности обеспечивают композиции, содержащие легкие пористые компоненты — термообработанную опоку и керамзитовую пыль, тогда как стеклопорошок оказывает преимущественно химическое влияние на процессы структурообразования.

4. Научно обосновано, что повышение энергоэффективности силикатного кирпича связано не только с уменьшением средней плотности

материала, но и с качественным изменением его поровой структуры. Установлено, что коэффициент теплопроводности определяется совокупностью факторов, включающих размеры, форму, распределение и степень замкнутости пор, а также особенностями формирования гидросиликатной матрицы.

5. Установлено, что максимальный теплоизоляционный эффект достигается при комплексном использовании стеклопорошка и золы-уноса, обеспечивающем наиболее существенное снижение коэффициента теплопроводности вследствие синергетического воздействия аморфного кремнезема и алюмосиликатных компонентов на процессы гидротермального структурообразования.

6. Показано, что использование стеклопорошка обеспечивает наиболее эффективное сохранение прочностных характеристик силикатного кирпича, поскольку аморфный кремнезем активно участвует в формировании гидросиликатной цементирующей матрицы. Композиции с керамзитовой пылью и термообработанной опокой сопровождаются закономерным снижением прочности, однако достигнутые значения соответствуют требованиям к конструкционно-теплоизоляционным силикатным изделиям.

7. Установлено, что увеличение общей пористости не приводит к пропорциональному снижению морозостойкости материала. Экспериментальные результаты подтверждают, что долговечность силикатного кирпича определяется преимущественно морфологией и пространственной организацией порового пространства, а не только величиной водопоглощения.

8. Научно обоснован многокритериальный принцип выбора рациональных составов силикатной массы, предусматривающий комплексную оценку средней плотности, прочности, коэффициента теплопроводности, водопоглощения, морозостойкости, технологичности и экологической эффективности вместо традиционной оптимизации по одному показателю.

9. Разработана классификация рациональных областей применения исследованных композиционных систем. Установлено, что стеклопорошок наиболее эффективен для получения конструкционного силикатного кирпича; композиция «стеклопорошок — зола-уноса» — для производства энергоэффективных стеновых материалов; композиция «стеклопорошок — керамзитовая пыль» — для изготовления облегченных изделий; термообработанная опока — для получения конструкционно-теплоизоляционного силикатного кирпича с использованием местной сырьевой базы.

10. Впервые сформулирована научная концепция направленного проектирования структуры энергоэффективного силикатного кирпича, основанная на управляемом выборе природных и техногенных кремнеземсодержащих компонентов в зависимости от требуемого

комплекса эксплуатационных свойств материала. В отличие от традиционного подхода, предусматривающего применение одного модифицирующего компонента, предложенная концепция позволяет целенаправленно формировать структуру и свойства силикатного кирпича путем выбора наиболее эффективной композиционной системы для конкретных условий эксплуатации.

11. Научно доказано, что комплексное использование вторичного стекольного сырья, золы-уноса, керамзитовой пыли и природной термообработанной опоки обеспечивает не только повышение эксплуатационных характеристик силикатного кирпича, но и способствует реализации принципов ресурсосбережения, циркулярной экономики и рационального использования природных ресурсов Республики Казахстан.

12. Полученные результаты формируют научную основу создания нового поколения энергоэффективных автоклавных силикатных материалов, в которых требуемые физико-механические и теплофизические характеристики достигаются путем направленного регулирования процессов гидротермального структурообразования с использованием природного и техногенного кремнеземсодержащего сырья.

ГЛАВА 8. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

8.1 Цель и задачи опытно-промышленных испытаний

Результаты лабораторных исследований, изложенные в предыдущих главах монографии, позволили установить основные закономерности влияния переработанного стеклопорошка, а также его сочетаний с золой-уносом и керамзитовой пылью на процессы гидротермального структурообразования, формирование порового пространства и комплекс эксплуатационных свойств силикатного кирпича. Были разработаны рациональные составы сырьевых смесей, определены параметры подготовки техногенных компонентов, обоснованы режимы формования и автоклавного твердения, а также подтверждена возможность снижения средней плотности и коэффициента теплопроводности изделий при сохранении требуемых показателей прочности и морозостойкости.

Вместе с тем положительные результаты, полученные на лабораторных образцах, сами по себе не являются достаточным основанием для непосредственного промышленного внедрения разработанной технологии. Лабораторные условия обеспечивают высокую точность дозирования компонентов, ограниченный объем замеса, контролируемое перемешивание и возможность индивидуального регулирования режимов формования и твердения. При переходе к промышленному производству существенно возрастают объемы перерабатываемой сырьевой массы, продолжительность технологических операций, влияние неоднородности сырья и вероятность отклонений отдельных параметров процесса.

Поэтому переход от лабораторного этапа к опытно-промышленной апробации являлся закономерным и необходимым этапом исследования. Его проведение было направлено на проверку воспроизводимости установленных закономерностей в условиях действующего предприятия, где приготовление сырьевой смеси, формование и автоклавная обработка осуществляются не на лабораторном, а на штатном промышленном оборудовании.

Особое значение имела оценка технологической совместимости стеклопорошка и модифицирующих добавок с существующей производственной линией. Необходимо было установить, не вызывают ли новые компоненты затруднений при транспортировании и дозировании сырья, не изменяют ли они однородность и формовочную влажность силикатной массы, не ухудшают ли прессуемость смеси, устойчивость сырца и качество изделий после автоклавного твердения. Одновременно

требовалось подтвердить, что положительный теплофизический эффект, выявленный в лабораторных условиях, сохраняется при выпуске крупной промышленной партии.

Опытно-промышленные испытания были проведены 30–31 июля 2026 года в рамках научного проекта программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR24993125 «Рациональная технология использования стеклянных отходов в производстве силикатного кирпича для повышения теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций при реконструкции объектов жилищно-коммунального хозяйства». Промышленной площадкой являлось АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов», а целью испытаний в акте определены проверка эффективности разработанной технологии, оценка возможности ее внедрения без изменения существующей технологической схемы и подтверждение соответствия опытной продукции нормативным требованиям.

Предпосылки перехода к промышленной апробации

Необходимость проведения опытно-промышленных испытаний определялась совокупностью научных, технологических и практических предпосылок.

Во-первых, лабораторные исследования подтвердили принципиальную возможность использования стеклопорошка как активного кремнеземсодержащего компонента силикатной массы. Было установлено, что аморфный диоксид кремния стекла участвует в гидротермальном взаимодействии с кальциевой составляющей, влияет на образование C–S–H- и тоберморитоподобных продуктов и способствует изменению поровой структуры автоклавного материала.

Во-вторых, экспериментально доказана эффективность комплексного модифицирования силикатной массы. Совместное применение стеклопорошка с золой-уносом и керамзитовой пылью позволило использовать различия в химико-минералогическом составе, дисперсности и морфологии техногенных компонентов для направленного регулирования плотности, теплопроводности и прочности силикатного кирпича.

В-третьих, разработанные составы были ориентированы на применение традиционной известково-песчаной сырьевой базы и стандартных технологических операций производства силикатного кирпича. Это создавало предпосылки для интеграции технологии в действующее производство без полной реконструкции предприятия.

В-четвертых, промышленная апробация была необходима для оценки масштабируемости лабораторных результатов. При увеличении объема замеса могли проявиться факторы, практически не влияющие на

малые лабораторные партии: сегрегация компонентов, образование агломератов тонкодисперсных добавок, изменение водопотребности, неравномерность распределения влаги, колебания давления прессования и неодинаковая интенсивность прогрева изделий в автоклаве.

В-пятых, требовалось подтвердить соответствие опытной продукции требованиям ГОСТ 379–2015 не по отдельным образцам, а по кирпичу, изготовленному в непрерывном производственном цикле. В соответствии с актом контролю подлежали прочность при сжатии, средняя плотность, водопоглощение, теплопроводность, морозостойкость, влажность после автоклавирования, геометрические размеры и внешний вид изделий.

Таким образом, опытно-промышленный этап должен был подтвердить не только материаловедческую эффективность разработанных составов, но и их технологическую устойчивость, нормативную пригодность и возможность последующего внедрения.

Обоснование выбора АО «ЗККСМ» в качестве промышленной площадки

Выбор АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов» для проведения опытно-промышленных испытаний был обусловлен тем, что предприятие располагает действующей технологической линией полного цикла производства силикатного кирпича. Это позволило выполнить проверку разработанной технологии в реальных производственных условиях, включая подготовку сырья, промышленное дозирование, приготовление силикатной массы, полусухое прессование, автоклавную обработку и заводской контроль качества готовой продукции.

Принципиально важным являлось использование штатного оборудования предприятия. Согласно акту, изготовление опытных партий проводилось без внесения изменений в существующую производственную линию, а все технологические операции выполнялись в соответствии с действующим регламентом АО «ЗККСМ». Это обеспечило объективную оценку адаптируемости разработанных составов к серийному производству и исключило влияние специально созданных лабораторных условий.

Дополнительным основанием для выбора предприятия являлось использование в его текущем производстве тех же основных сырьевых компонентов, которые были приняты в лабораторных исследованиях: кварцево-полевошпатового песка месторождения «Меловые горки» и строительной воздушной извести I сорта. В опытные смеси дополнительно вводились стеклопорошок из отходов ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС», керамзитовая пыль ТОО «Стройкомбинат» и зола-унос. Все материалы прошли входной контроль перед началом испытаний.

Размещение АО «ЗККСМ», ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС» и ТОО «Стройкомбинат» в Западно-Казахстанском регионе создает практические предпосылки для формирования локальной производственно-сырьевой цепочки. В данной системе отходы одного предприятия могут использоваться как компоненты сырьевой смеси другого производства, что соответствует принципам циркулярной экономики и снижает потребность в транспортировании природного минерального сырья.

Важное значение имело и наличие на предприятии производственной лаборатории, позволившей выполнить испытания опытной продукции по показателям, предусмотренным нормативной документацией. Благодаря этому результаты промышленной апробации могли оцениваться не только по устойчивости технологического процесса, но и по качеству конечной продукции.

Следовательно, АО «ЗККСМ» являлось наиболее подходящей базой для промышленной проверки, поскольку обеспечивало:

- полный производственный цикл изготовления силикатного кирпича;
- соответствие исходной сырьевой базы лабораторным исследованиям;
- наличие оборудования для промышленного дозирования, смешивания, прессования и автоклавирования;
- возможность выпуска крупной опытной партии;
- проведение нормативного лабораторного контроля;
- оценку внедрения технологии без модернизации основной линии.

Цель опытно-промышленных испытаний

Целью опытно-промышленных испытаний являлось подтверждение в условиях действующего производства технологической реализуемости и эффективности разработанной технологии получения энергоэффективного силикатного кирпича с использованием стеклопорошка как самостоятельного модифицирующего компонента и в сочетании с керамзитовой пылью и золой-уносом, а также установление соответствия опытной продукции требованиям нормативной документации.

Данная цель включала три взаимосвязанных аспекта:

1. Технологический аспект — проверка совместимости новых сырьевых компонентов с действующей производственной схемой АО «ЗККСМ».

2. Материаловедческий аспект — подтверждение сохранения выявленных лабораторных закономерностей изменения плотности, теплопроводности, прочности и долговечности при масштабировании технологии.

3. Производственно-нормативный аспект — установление возможности выпуска продукции стабильного качества, соответствующей требованиям ГОСТ 379–2015.

Задачи промышленной проверки технологии

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Подготовить промышленные партии стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса, проверить их влажность, гранулометрический состав и пригодность к дозированию на штатном оборудовании.

2. Осуществить входной контроль кварцево-полевошпатового песка, строительной извести и техногенных компонентов перед включением их в промышленный технологический процесс.

3. Адаптировать разработанные лабораторные рецептуры к системе промышленного дозирования АО «ЗККСМ» и обеспечить требуемую точность соотношения компонентов.

4. Проверить возможность получения однородной силикатной массы с равномерным распределением стеклопорошка и модифицирующих добавок при смешивании в промышленном смесителе принудительного действия.

5. Оценить влияние стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса на формовочную влажность, пластичность, сыпучесть, прессуемость и устойчивость сырца.

6. Провести полусухое прессование опытных изделий на штатном оборудовании при удельном давлении 20 МПа и установить отсутствие нарушений режима работы пресса. Давление прессования и последующая автоклавная обработка при температуре 174,5 °С и давлении 0,8 МПа соответствовали действующему производственному регламенту.

7. Проверить влияние разработанных составов на процессы автоклавного твердения, качество пропаривания и устойчивость геометрической формы изделий.

8. Выпустить опытные партии трех видов силикатного кирпича: со стеклопорошком; со стеклопорошком и керамзитовой пылью; со стеклопорошком и золой-уносом и с термообработанной опокой. В рамках испытаний изготовлено по 50 тыс. кирпичей каждого состава, то есть суммарно 200 тыс. единиц продукции.

9. Провести визуальный контроль готовых изделий и оценить наличие трещин, сколов, расслоений, деформаций и других технологических дефектов.

10. Определить прочность при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение, коэффициент теплопроводности, морозостойкость, остаточную влажность, геометрические размеры и внешний вид опытной продукции.

11. Сопоставить показатели опытных партий с характеристиками традиционного силикатного кирпича и требованиями нормативной документации.

12. Установить возможность внедрения разработанной технологии без модернизации основного оборудования и изменения принципиальной технологической схемы предприятия.

13. Оценить предпосылки ресурсосбережения за счет частичной замены природного кварцевого сырья стеклянными отходами и другими техногенными компонентами.

14. Подготовить технологические рекомендации для последующего утверждения производственного регламента и перевода разработанной технологии из опытно-промышленной стадии в регулярное промышленное производство.

Таким образом, опытно-промышленные испытания рассматривались не только как проверка отдельных составов, но и как комплексная оценка всей технологической системы: подготовка вторичного сырья → промышленное дозирование → приготовление силикатной массы → полусухое прессование → автоклавное твердение → нормативный контроль → оценка готовности к внедрению.

Реализация поставленных задач позволила перейти от лабораторного обоснования разработанной технологии к подтверждению ее работоспособности, воспроизводимости и эффективности в производственных условиях АО «ЗККСМ».

8.2 Производственная база АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов»

Опытно-промышленные испытания разработанной технологии проводились на производственной площадке АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов» — действующего предприятия по выпуску автоклавных силикатных стеновых изделий. Выбор промышленной базы имел принципиальное значение, поскольку позволял проверить результаты лабораторных исследований в условиях реального технологического потока, при значительных объемах сырьевых смесей и с использованием штатного производственного оборудования.

В соответствии с актом опытно-промышленных испытаний работы были проведены 30–31 июля 2026 года. Изготовление опытных партий осуществлялось непосредственно на действующей производственной

линии предприятия, без внесения конструктивных изменений в оборудование и без нарушения принятого технологического регламента.

АО «ЗККСМ» располагает производственной инфраструктурой, обеспечивающей полный технологический цикл изготовления силикатного кирпича:

прием и подготовка сырья → дозирование компонентов → приготовление силикатной массы → полусухое прессование → автоклавная обработка → контроль качества → складирование готовой продукции.

Наличие полного производственного цикла позволило исследовать не отдельную операцию, а технологическую совместимость разработанных составов со всеми основными переделами промышленного производства.

8.2.1 Краткая характеристика предприятия

АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов» было выбрано в качестве базы опытно-промышленной апробации как предприятие, специализирующееся на производстве силикатного кирпича и располагающее необходимой технологической, лабораторной и кадровой инфраструктурой.

Производственная деятельность предприятия основана на использовании местного минерального сырья. В качестве основного кремнеземсодержащего компонента применяется кварцево-полевошпатовый песок месторождения «Меловые горки», а источником кальциевой составляющей служит строительная воздушная известь I сорта, соответствующая требованиям ГОСТ 9179–2018. При проведении опытно-промышленных испытаний к традиционным компонентам дополнительно вводились стеклопорошок, полученный из отходов ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС», термообработанная опока, керамзитовая пыль ТОО «Стройкомбинат» и зола-унос. Перед использованием все материалы прошли входной контроль качества.

Важным преимуществом предприятия является наличие собственной службы производственного контроля и испытательной лаборатории. Это позволило осуществлять оперативную оценку качества сырья, контролировать технологические параметры и проводить испытания готовой продукции непосредственно после завершения промышленного цикла.

В испытательной лаборатории предприятия определялись предел прочности при сжатии, средняя плотность, водопоглощение, коэффициент теплопроводности, морозостойкость, остаточная влажность после автоклавирования, геометрические размеры и внешний вид опытных изделий. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 379–2015 и действующей нормативной документацией.

Таким образом, АО «ЗККСМ» располагало необходимыми условиями для проведения комплексной промышленной проверки разработанной технологии — от подготовки сырьевых компонентов до нормативной оценки готового силикатного кирпича.

8.2.2 Существующая технологическая линия производства силикатного кирпича

Действующая технологическая линия предприятия построена по традиционной схеме производства силикатных изделий автоклавного твердения. Ее основными стадиями являются подготовка кремнеземсодержащего и известкового сырья, дозирование компонентов, приготовление однородной силикатной массы, формование сырца методом полусухого прессования и последующая гидротермальная обработка насыщенным водяным паром.

В процессе опытно-промышленных испытаний последовательно выполнялись следующие операции:

- подготовка и входной контроль сырьевых материалов;
- дозирование компонентов по разработанным рецептурам;
- приготовление силикатной массы;
- формование изделий методом полусухого прессования;
- автоклавная обработка сырца;
- визуальный и лабораторный контроль готовой продукции.

Подготовка исходных материалов включала проверку влажности и гранулометрического состава, а также приведение стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли в состояние, пригодное для равномерного дозирования и смешивания. Особое внимание уделялось предотвращению образования агломератов тонкодисперсных добавок и обеспечению их равномерного распределения в объеме сырьевой массы.

Компоненты дозировались на производственных электронных весах в соответствии с утвержденными опытными рецептурами. Применение промышленной системы весового дозирования обеспечивало воспроизводимость состава и позволяло оценить возможность включения новых компонентов в действующую систему материальных потоков предприятия.

Приготовление силикатной массы осуществлялось в смесителе принудительного действия. Основным технологическим требованием являлось получение однородной смеси с равномерным распределением извести, песка, стеклопорошка и модифицирующих добавок, а также достижение оптимальной формовочной влажности. Согласно акту, смешивание опытных составов проходило устойчиво и не потребовало изменения принятой последовательности операций.

Формование изделий выполнялось методом полусухого прессования при удельном давлении 20 МПа. Данный режим соответствовал производственным условиям АО «ЗККСМ» и обеспечивал получение сырца требуемой формы и достаточной транспортной прочности.

Завершающей стадией являлось автоклавное твердение. Обработка проводилась насыщенным водяным паром при температуре 174,5 °С и рабочем давлении 0,8 МПа. Применение действующего промышленного режима имело принципиальное значение, поскольку подтверждало возможность получения модифицированных изделий без увеличения температуры, давления или продолжительности основного производственного цикла.

После автоклавирования изделия направлялись на визуальный контроль и лабораторные испытания. Такая организация технологического процесса позволила проследить устойчивость разработанных составов на всех производственных стадиях и оценить качество готовой продукции по нормативным показателям.

8.2.3 Основное технологическое оборудование

К основным технологическим единицам относились:

1. Оборудование для дробления и измельчения стеклянных отходов. Оно обеспечивало получение стеклопорошка, пригодного для дозирования и введения в силикатную массу.

2. Производственные электронные весы. Весовое оборудование использовалось для дозирования песка, извести, стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса по разработанным рецептурам.

3. Смеситель принудительного действия. Оборудование обеспечивало интенсивное перемешивание компонентов, равномерность состава и требуемую формовочную влажность силикатной массы.

4. Промышленный пресс для полусухого формования. Формование осуществлялось при удельном давлении 20 МПа. Пресс должен был обеспечить устойчивость сырца, точность геометрических размеров и отсутствие расслоений при введении техногенных добавок.

5. Промышленный автоклав. В нем выполнялась обработка сформованных изделий насыщенным водяным паром при температуре 174,5 °С и давлении 0,8 МПа. Фотоматериалы акта демонстрируют загрузку сформованных изделий в автоклав и их перемещение на вагонетках.

6. Лабораторное испытательное оборудование. Оно использовалось для определения массы, геометрических параметров, прочности, водопоглощения и других показателей качества опытного кирпича.



Рисунок 7.1 – Основные технологические операции опытно-промышленного изготовления силикатного кирпича на производственной базе АО «ЗККСМ»

Представленные фотографии отражают последовательное прохождение опытных составов через штатную технологическую линию предприятия. Отсутствие специально созданного опытного участка подтверждает, что разработанная технология была интегрирована непосредственно в действующий производственный процесс.

8.2.4 Производственная мощность опытной апробации

Общая производственная годовая проектная мощность АО «ЗККСМ» составляет 80 млн. штук кирпича.

Вместе с тем масштаб проведенной апробации характеризуется фактическим объемом опытного выпуска. В ходе промышленных испытаний была изготовлена опытно-промышленная партия силикатного кирпича общим количеством 5446 штук. Расход сырьевых материалов приведен отдельно по каждому исследуемому составу. Таким образом, общий объем выпущенной в рамках промышленных испытаний продукции составил 5446 изделий.

Такой объем существенно превышает масштабы лабораторных и укрупненно-лабораторных исследований и позволяет оценивать проведенную работу как полноценную промышленную апробацию. Выпуск десятков тысяч изделий каждого состава обеспечил возможность проверить:

- стабильность дозирования компонентов в течение производственного цикла;
- устойчивость перемешивания крупных объемов сырьевой массы;
- повторяемость формования изделий;
- равномерность автоклавной обработки;
- сохранение геометрии и внешнего вида продукции;
- воспроизводимость физико-механических и теплофизических показателей.

При последующем включении в монографию официальной справки предприятия о проектной или фактической годовой мощности данный подраздел может быть дополнен сведениями о производительности технологической линии, количестве прессов, вместимости автоклавов и сменном режиме работы.

8.2.5 Причины выбора предприятия в качестве промышленной площадки

Выбор АО «ЗККСМ» определялся совокупностью технологических, сырьевых, организационных и региональных факторов.

Первая причина заключалась в профильной специализации предприятия. Наличие действующей линии производства автоклавного

силикатного кирпича позволяло проверить технологию в условиях, полностью соответствующих ее предполагаемому промышленному назначению.

Вторая причина состояла в соответствии сырьевой базы предприятия составом, использованным в лабораторных исследованиях. Применение песка месторождения «Меловые горки» и строительной извести обеспечивало преемственность между лабораторным и промышленным этапами.

Третьей причиной являлась возможность использовать существующее оборудование без реконструкции. Согласно результатам испытаний, введение стеклопорошка, термообработанной опоки, керамзитовой пыли и золы-уноса не вызвало нарушений при приготовлении массы, формовании и автоклавном твердении. Все операции выполнялись устойчиво, без отклонений от регламента предприятия.

Четвертая причина связана с наличием системы заводского контроля качества. Производственная лаборатория обеспечивала проверку опытной продукции по нормативным показателям и позволяла оперативно сопоставлять ее с традиционным кирпичом.

Пятая причина определяется региональной интеграцией источников вторичного сырья. Стекланные отходы поступали от ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС», а керамзитовая пыль — от ТОО «Стройкомбинат». Использование местных отходов уменьшает логистическую составляющую и создает предпосылки для формирования регионального промышленного кластера по принципу «отход одного производства — сырье другого производства».

Шестая причина заключалась в возможности оценить не только технические характеристики отдельных образцов, но и организационно-технологическую готовность предприятия к дальнейшему внедрению разработки. По итогам испытаний комиссия подтвердила возможность применения технологии на действующем оборудовании и рекомендовала ее внедрение после утверждения технологического регламента.

Таким образом, производственная база АО «ЗККСМ» обеспечила необходимые условия для объективной проверки разработанной технологии по всей цепочке — от приема и дозирования вторичного сырья до получения и нормативной оценки готового силикатного кирпича.

Наличие на предприятии полного технологического цикла позволило перейти к разработке и промышленному опробованию трех вариантов сырьевых смесей: со стеклопорошком, со стеклопорошком и керамзитовой пылью, а также со стеклопорошком и золой-уносом. Особенности выбора компонентов, подготовки техногенного сырья и расчета производственных рецептур рассматриваются в следующем разделе.

8.3 Подготовка сырьевых материалов и разработка промышленных составов

Переход от лабораторных исследований к опытно-промышленной апробации потребовал решения комплекса технологических задач, связанных с подготовкой сырьевых материалов, адаптацией разработанных рецептур к условиям действующего производства и обеспечением стабильности технологического процесса при изготовлении опытных партий силикатного кирпича. Если в лабораторных условиях основное внимание уделялось установлению закономерностей влияния стеклопорошка и других техногенных компонентов на процессы гидротермального структурообразования, то промышленный этап был направлен на подтверждение возможности использования разработанных составов при серийном производстве изделий без изменения существующей технологической схемы предприятия.

При разработке опытно-промышленных составов исходили из необходимости максимально сохранить технологический регламент АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов» и одновременно обеспечить реализацию научных решений, полученных в результате лабораторных исследований. Поэтому изменение рецептур ограничивалось введением модифицирующих компонентов при сохранении основных параметров приготовления силикатной массы, режимов формования и автоклавного твердения.

В соответствии с программой опытно-промышленных испытаний были разработаны три экспериментальные композиционные системы:

- с использованием термообработанной опоки;
- силикатная масса с использованием переработанного стеклопорошка;
- силикатная масса с использованием стеклопорошка и керамзитовой пыли;
- силикатная масса с использованием стеклопорошка и золы-уноса.

Такой подход позволил в промышленных условиях проверить результаты, полученные в главах 3–5 настоящей монографии, и установить степень воспроизводимости лабораторных закономерностей при масштабировании технологии.

8.3.1 Подготовка стеклопорошка

Основным модифицирующим компонентом всех опытных составов являлся стеклопорошок, полученный путем переработки стеклянных отходов ТОО «СТЕКЛОСЕРВИС». Использование данного материала обусловлено высоким содержанием аморфного диоксида кремния,

обладающего повышенной реакционной способностью в условиях автоклавной обработки.

Подготовка стеклянных отходов включала несколько последовательных технологических операций:

- сортировку поступившего стеклобоя;
- удаление посторонних включений;
- дробление;
- тонкое измельчение;
- контроль гранулометрического состава;
- подготовку порошка к промышленному дозированию.

Особое внимание уделялось достижению высокой однородности материала, поскольку именно дисперсность стеклопорошка определяет скорость растворения аморфного кремнезема и интенсивность образования гидросиликатных фаз. Проведенный входной контроль подтвердил соответствие подготовленного стеклопорошка требованиям технологического регламента опытно-промышленных испытаний.

После подготовки стеклопорошок поступал на участок дозирования, где совместно с традиционными компонентами включался в состав силикатной массы.

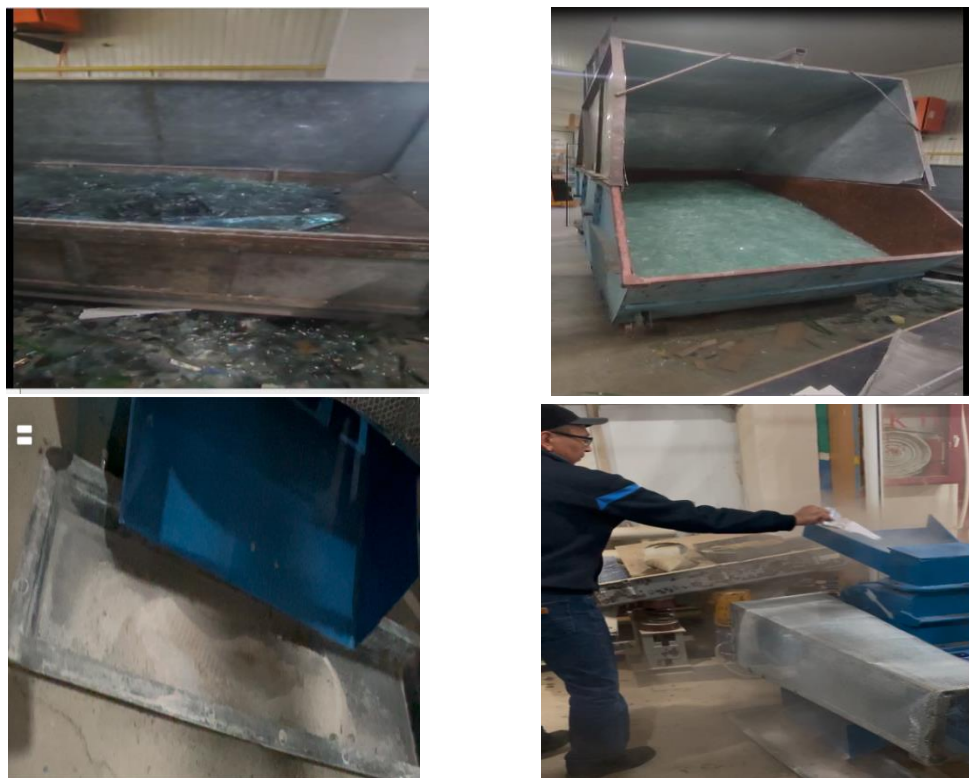


Рисунок 7.2 – Подготовка стеклянных отходов и получение стеклопорошка для опытно-промышленного производства силикатного кирпича

Предварительная подготовка стеклянных отходов обеспечивает получение однородного тонкодисперсного кремнеземсодержащего

компонента, пригодного для промышленного дозирования и равномерного распределения в объеме силикатной массы.

8.3.2 Подготовка композиции «стеклопорошок + керамзитовая пыль»

Вторым направлением опытно-промышленных исследований являлось использование композиционной добавки, включающей стеклопорошок и керамзитовую пыль.

Керамзитовая пыль образуется при дроблении, транспортировании и сортировке керамзитового гравия на предприятии ТОО «Стройкомбинат» и представляет собой тонкодисперсный алюмосиликатный материал с развитой пористой структурой.

Перед использованием керамзитовая пыль проходила:

- контроль влажности;
- проверку гранулометрического состава;
- удаление случайных механических примесей;
- подготовку к совместному дозированию со стеклопорошком.

На основании результатов лабораторных исследований было установлено, что совместное использование стеклопорошка и керамзитовой пыли позволяет одновременно регулировать процессы гидротермального фазообразования и формировать более развитую мелкопористую структуру силикатного кирпича. Введение керамзитовой пыли способствует снижению средней плотности изделий, а стеклопорошок компенсирует возможное снижение прочности за счет дополнительного образования гидросиликатов кальция.

Поэтому при разработке промышленной рецептуры особое внимание уделялось обеспечению равномерного распределения обоих компонентов в объеме силикатной массы.

8.3.3 Подготовка композиции «стеклопорошок + зола-уноса»

Третьим вариантом опытных составов являлась композиция, содержащая стеклопорошок и золу-уноса. Зола-уноса представляет собой тонкодисперсный алюмосиликатный материал сферической формы, характеризующийся высоким содержанием аморфных кремнеземистых и алюмосиликатных фаз.

Перед использованием выполнялись:

- контроль влажности;
- определение однородности материала;
- проверка отсутствия агломератов;
- подготовка золы к совместному дозированию.

Совместное использование золы-уноса и стеклопорошка обеспечивает комплексное влияние на процессы гидротермального твердения. Аморфный кремнезем стекла ускоряет образование гидросиликатов кальция, тогда как алюмосиликатная составляющая золы вовлекается в процессы формирования гидроалюмосиликатной матрицы. Кроме того, сферическая форма частиц золы способствует более плотной упаковке зерен силикатной массы и улучшению технологических свойств смеси при прессовании.

8.3.4 Разработка промышленных составов силикатной массы

Разработка опытно-промышленных составов осуществлялась на основе результатов лабораторных исследований, представленных в предыдущих главах монографии. При этом основной задачей являлось сохранение научно обоснованных соотношений компонентов при адаптации рецептур к условиям действующего производства.

В отличие от лабораторных испытаний, где оценивалось влияние отдельных факторов на свойства материала, при промышленной апробации необходимо было обеспечить:

- устойчивое дозирование компонентов;
- получение однородной силикатной массы;
- стабильность формовочной влажности;
- хорошую прессуемость смеси;
- сохранение геометрии сырца;
- соответствие режима автоклавного твердения действующему производственному регламенту.

Опытные составы были разработаны таким образом, чтобы их применение не требовало изменения существующей технологии производства силикатного кирпича.

В соответствии с программой опытно-промышленных испытаний были приготовлены три серии сырьевых смесей, характеристики которых приведены в таблицах 7.1–7.3.

Первым этапом опытно-промышленной апробации стала проверка возможности использования переработанного стеклопорошка в качестве самостоятельного модифицирующего компонента силикатной массы. При разработке рецептуры исходили из необходимости сохранения технологической совместимости компонентов и обеспечения стабильного протекания процессов формования и автоклавного твердения. Составы опытных сырьевой смеси представлены в таблице 8.1-8.4

Таблица 8.1 – Состав опытной сырьевой смеси с использованием кремнистой опоки

№	Кремнистая опока, %	Известь, %	Песок, %
1	20	12,5	67,5

Таблица 8.2 – Состав опытной силикатной массы со стеклопорошком

№	Стеклопорошок, %	Известь, %	Песок, %
1	10	12,5	77,5

На следующем этапе исследований была разработана композиционная система, предусматривающая совместное использование стеклопорошка и керамзитовой пыли. Такое сочетание компонентов было направлено на одновременное регулирование процессов гидротермального структурообразования и формирования облегченной пористой структуры силикатного кирпича. Состав опытной смеси представлен в таблице 7.2.

Таблица 8.3 – Состав опытной силикатной массы со стеклопорошком и керамзитовой пылью

№	Стеклопорошок, %	Модифицирующая добавка керамзитовая пыль, %	Известь, %	Песок, %
1	5	15	12,5	67,5

Заключительным этапом разработки промышленных рецептов являлось приготовление композиционной системы на основе стеклопорошка и золы-уноса. Данный состав был ориентирован на комплексное использование аморфного кремнезема стекла и реакционноспособных алюмосиликатных компонентов золы для интенсификации процессов гидротермального твердения. Разработанная рецептура приведена в таблице 7.3.

Таблица 8.4 – Состав опытной силикатной массы со стеклопорошком и золой-уноса

№	Стеклопорошок, %	Модифицирующая добавка зола-уноса, %	Известь, %	Песок, %
1	5	15	12,5	67,5

Таким образом, подготовка сырьевых материалов и разработка промышленных составов подтвердили возможность использования стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса в условиях

действующего производства силикатного кирпича. Проведенные подготовительные операции обеспечили получение однородных композиционных смесей, пригодных для промышленного дозирования, смешивания, полусухого прессования и автоклавного твердения без изменения существующей технологической схемы предприятия. Созданные опытные рецептуры стали основой для последующего изготовления опытных партий силикатного кирпича и комплексной оценки их технологических и эксплуатационных характеристик в производственных условиях.

8.4 Особенности проведения опытно-промышленных испытаний

После подготовки сырьевых материалов и утверждения промышленных рецептов следующим этапом являлось изготовление опытных партий силикатного кирпича в условиях действующей технологической линии АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов». Основная задача данного этапа заключалась в проверке устойчивости всех технологических операций при введении стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса в объемах, соответствующих промышленному производству.

Опытно-промышленные испытания проводились 30–31 июля 2026 года. Изготовление изделий осуществлялось на штатном оборудовании предприятия без реконструкции производственной линии и без изменения принятой последовательности технологических операций. Приготовление опытных составов, их формование и автоклавное твердение выполнялись в соответствии с действующим технологическим регламентом АО «ЗККСМ».

Особенность промышленной апробации состояла в том, что проверке подвергались не отдельные лабораторные образцы, а три крупные партии изделий, изготовленные в условиях реального производственного потока:

- силикатный кирпич со стеклопорошком;
- силикатный кирпич со стеклопорошком и керамзитовой пылью;
- силикатный кирпич со стеклопорошком и золой-уносом.

Это позволило оценить не только свойства готового материала, но и технологическое поведение новых сырьевых компонентов на всех стадиях производства.

8.4.1 Организация технологического процесса

Проведение опытно-промышленных испытаний включало последовательное выполнение следующих операций:

1. входной контроль и подготовку сырьевых материалов;
2. промышленное дозирование компонентов;

3. приготовление силикатной массы;
4. формование сырца методом полусухого прессования;
5. транспортирование и укладку изделий на автоклавные вагонетки;
6. автоклавную обработку насыщенным водяным паром;
7. выгрузку и визуальный контроль изделий;
8. отбор образцов для лабораторных испытаний;
9. оценку соответствия готовой продукции требованиям нормативной документации.

Такая последовательность полностью соответствовала действующей технологической схеме предприятия. Введение техногенных компонентов осуществлялось на стадии дозирования сырья, вследствие чего не требовалось создания отдельного технологического передела для их использования.

При организации испытаний особое внимание уделялось сохранению сопоставимости между опытными составами. Все партии изготавливались на одном и том же оборудовании, при одинаковом режиме прессования и автоклавной обработки. Это позволяло связывать различия в свойствах готовых изделий преимущественно с составом сырьевой смеси, а не с изменением производственных параметров.

8.4.2 Входной контроль сырьевых материалов

До начала изготовления опытных партий исходные компоненты подвергались входному контролю. Для кварцево-полевошпатового песка, строительной извести, стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса оценивали состояние материала, влажность, однородность и пригодность к промышленному дозированию.

Контроль влажности имел особое значение, поскольку изменение содержания свободной воды в тонкодисперсных компонентах способно влиять на фактическую формовочную влажность силикатной массы. При повышенной влажности добавок возрастает риск образования агрегатов, снижается точность весового дозирования и ухудшается равномерность распределения частиц в смеси.

Проверка гранулометрического состава была необходима для предупреждения попадания крупных включений, способных вызвать:

- локальное нарушение однородности сырьевой массы;
- дефекты поверхности сырца;
- неравномерное уплотнение при прессовании;
- образование внутренних концентраторов напряжений;
- снижение качества готового кирпича.

Все примененные материалы прошли входной контроль до начала промышленного цикла и были признаны пригодными для приготовления опытных составов.

8.4.3 Дозирование компонентов

Дозирование компонентов осуществлялось на производственных электронных весах предприятия в соответствии с рецептурами, представленными в таблицах 7.1–7.3. Точность дозирования являлась одним из ключевых условий воспроизводимости состава, особенно при введении стеклопорошка в количестве 5–10 % и модифицирующих добавок в количестве 15 %.

В отличие от традиционной силикатной массы, включавшей песок и известь, опытные композиции содержали три или четыре компонента. Это увеличивало требования к организации дозировочного процесса, поскольку ошибка в количестве одной из добавок могла изменить:

- соотношение кальциевой и кремнеземсодержащей составляющих;
- объем тонкодисперсной фракции;
- водопотребность смеси;
- плотность сырца;
- характер гидротермального фазообразования;
- конечные физико-механические свойства изделий.

Промышленное дозирование показало, что стеклопорошок, керамзитовая пыль и зола-унос могут быть включены в существующую систему весовой подачи сырья. Существенных затруднений, связанных с зависанием компонентов, нарушением подачи или невозможностью обеспечения требуемой точности, в акте испытаний не зафиксировано. Дозирование осуществлялось по разработанным рецептурам и обеспечивало требуемую точность приготовления силикатной массы.

8.4.4 Приготовление силикатной массы

После дозирования компоненты поступали в смеситель принудительного действия. Целью перемешивания являлось получение однородной композиции с равномерным распределением стеклопорошка и модифицирующих добавок в объеме традиционной известково-песчаной массы.

Применение принудительного перемешивания имело особое значение для опытных составов. Тонкодисперсные частицы склонны к агломерации, а различия в насыпной плотности песка, стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли могут создавать предпосылки для расслоения смеси. Поэтому технологическая устойчивость данного этапа оценивалась по следующим признакам:

- отсутствию видимых скоплений отдельных компонентов;
- равномерности окраски и внешнего вида массы;
- стабильности формовочной влажности;
- отсутствию крупных комков и сухих участков;

- сохранению сыпучести, необходимой для подачи в пресс;
- однородности сырца после формования.

Согласно акту, смешивание продолжалось до получения однородной массы и оптимальной формовочной влажности. Введение стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса не потребовало изменения принципиальной схемы приготовления смеси.

Научное значение данного результата заключается в подтверждении совместимости разработанных компонентов с промышленным смесительным оборудованием. Лабораторная эффективность добавок могла бы не реализоваться при недостаточной однородности крупного замеса. Однако устойчивое приготовление массы показало возможность воспроизводимого распределения техногенных компонентов в промышленных объемах.

8.4.5 Формование изделий методом полусухого прессования

Формование опытных изделий осуществлялось методом полусухого прессования при удельном давлении 20 МПа. Данный показатель соответствовал действующему технологическому режиму предприятия.

На стадии прессования оценивались:

- равномерность заполнения пресс-формы;
- уплотняемость сырьевой массы;
- устойчивость давления прессования;
- сохранение формы сырца после извлечения;
- прочность свежотформованных изделий;
- отсутствие расслоений, трещин и сколов;
- пригодность сырца к транспортированию и укладке на вагонетки.

Введение тонкодисперсных компонентов потенциально могло изменить трение между частицами, подвижность массы и характер передачи давления в пресс-форме. Керамзитовая пыль и зола-унос, обладающие более низкой насыпной плотностью по сравнению с кварцевым песком, могли также повлиять на степень уплотнения сырца.

Промышленные испытания показали, что все три опытных состава сохраняли способность к устойчивому формованию при стандартном давлении 20 МПа. Сырец имел правильную форму, обладал достаточной прочностью для последующих транспортных операций и не требовал корректировки давления прессования.

Данный результат имеет существенное практическое значение. Сохранение штатного режима формования исключает необходимость перенастройки или замены прессового оборудования и снижает технологические риски внедрения разработанных составов.

8.4.6 Формирование пакетов и подготовка к автоклавированию

После прессования сырец укладывался на автоклавные вагонетки. При формировании пакетов необходимо было обеспечить устойчивость изделий, равномерность зазоров и возможность свободного проникновения насыщенного водяного пара ко всей поверхности кирпича.

На данном этапе контролировались:

- геометрическая правильность сырца;
- отсутствие повреждений при механизированной укладке;
- устойчивость пакетов;
- равномерность размещения изделий;
- пригодность опытного кирпича к транспортированию по действующей системе.

Фотоматериалы акта показывают укладку опытного сырца на вагонетки и перемещение сформированных пакетов к автоклаву. Это подтверждает, что введение новых компонентов не ухудшило транспортную прочность изделий и не потребовало изменения схемы их укладки.

8.4.7 Автоклавная обработка опытных изделий

Автоклавное твердение выполнялось насыщенным водяным паром при температуре 174,5 °С и рабочем давлении 0,8 МПа. Режим соответствовал действующему технологическому регламенту АО «ЗККСМ».

Сохранение промышленного режима являлось принципиальным условием апробации. Разработанная технология должна была обеспечить формирование требуемой структуры материала без:

- повышения температуры автоклавирования;
- увеличения давления;
- продления изотермической выдержки;
- введения дополнительной тепловой обработки;
- изменения режима подъема и снижения давления.

В условиях автоклавной обработки происходили гидратация известкового компонента, растворение кремнеземсодержащих составляющих и формирование гидросиликатной матрицы. Стеклопорошок обеспечивал поступление реакционноспособного аморфного кремнезема, а алюмосиликатные компоненты золы-уноса и керамзитовой пыли участвовали в формировании более сложной системы гидратных новообразований.

Отсутствие отклонений в процессе автоклавирования подтвердило, что новые компоненты не вызывают нежелательных изменений, способных нарушить промышленный цикл, в частности:

- чрезмерного расширения сырца;
- деформации изделий;
- образования трещин;
- расслоения структуры;
- нарушения режима отвода конденсата;
- ухудшения выгрузки готовых изделий.

8.4.8 Объем выпущенных опытных партий

В ходе промышленных испытаний было изготовлено по 5446 штук силикатного кирпича каждого опытного состава. Общий объем выпуска составил 5446 изделий.

Такой масштаб производства позволил оценить стабильность технологии в условиях длительной работы оборудования и многократного повторения операций дозирования, смешивания, прессования и автоклавирования.

Выпуск 5446 изделий является важным доказательством масштабируемости разработанной технологии. В отличие от лабораторного эксперимента, крупная партия позволяет выявить возможные колебания свойств сырья, нестабильность дозирования, расслоение массы и неоднородность автоклавной обработки, которые могут не проявляться при изготовлении единичных образцов.

8.4.9 Визуальный контроль после автоклавной обработки

После завершения автоклавирования опытные изделия подвергались визуальному осмотру. В ходе контроля оценивались:

- правильность геометрической формы;
- ровность граней и поверхностей;
- состояние ребер и углов;
- наличие трещин;
- наличие расслоений;
- наличие сколов;
- общая однородность изделий.

Установлено, что опытные кирпичи имели правильную геометрическую форму, ровные грани и поверхности. Трещины, расслоения, сколы и другие технологические дефекты отсутствовали.

Отсутствие внешних дефектов подтверждает, что разработанные составы обеспечивали:

- достаточную однородность сырьевой смеси;
- устойчивость сырца при прессовании и транспортировании;
- равномерное протекание автоклавного твердения;
- отсутствие критических внутренних напряжений;

- технологическую совместимость добавок с базовой силикатной массой.

8.4.10 Оценка устойчивости производственного процесса

По результатам наблюдений в ходе опытно-промышленных испытаний установлено, что применение стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса не оказало отрицательного влияния на основные технологические операции.

Приготовление силикатной массы, формование и автоклавное твердение осуществлялись устойчиво, без отклонений от регламента предприятия.

Технологическая устойчивость подтверждалась следующими признаками:

- компоненты дозировались штатной системой весового оборудования;
- промышленный смеситель обеспечивал однородность массы;
- опытные смеси сохраняли способность к полусухому прессованию;
- давление формования не изменялось;
- сырец обладал достаточной транспортной прочностью;
- автоклавный режим сохранялся без корректировки;
- изделия не имели видимых технологических дефектов;
- производительность основной линии не была ограничена новыми составами.

Таким образом, промышленная апробация подтвердила отсутствие принципиальных технологических барьеров для применения разработанных рецептов.

Положительная оценка устойчивости технологического процесса являлась необходимым, но недостаточным условием для рекомендации разработанной технологии к внедрению. Окончательное заключение о ее эффективности могло быть сформулировано только после определения физико-механических, теплофизических и эксплуатационных показателей опытной продукции. Результаты заводского контроля качества и их сравнительный анализ рассматриваются в следующем разделе.

8.5 Анализ результатов опытно-промышленной апробации

После завершения технологического цикла опытные партии силикатного кирпича были подвергнуты визуальному контролю и комплексным лабораторным испытаниям в испытательной лаборатории АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов». Оценка качества продукции проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 379–2015 и действующей нормативной документации предприятия.

В качестве основных критериев эффективности разработанных составов были приняты предел прочности при сжатии, средняя плотность, водопоглощение, коэффициент теплопроводности, морозостойкость, влажность после автоклавной обработки, геометрические размеры и внешний вид изделий. Такой комплекс показателей позволил оценить не только механическую надежность опытного кирпича, но и его теплофизическую эффективность, долговечность и соответствие требованиям промышленного производства.

Особенностью данного этапа являлось сопоставление трех опытных композиционных систем с традиционным силикатным кирпичом:

- кирпича со стеклопорошком;
- кирпича со стеклопорошком и керамзитовой пылью;
- кирпича со стеклопорошком и золой-уносом.

Результаты испытаний приведены в таблице 8.4.

Таблица 8.4 – Основные физико-механические и теплофизические показатели опытных партий силикатного кирпича

№	Наименование показателя	Традиционный силикатный кирпич	Опытный силикатный кирпич с кремнистой опоккой	Опытный силикатный кирпич со стеклопорошком	Опытный силикатный кирпич со стеклопорошком и керамзитовой пылью	Опытный силикатный кирпич со стеклопорошком и золой-уносом	Заключение
1	Предел прочности при сжатии, МПа	не менее 15,0	20,00	24,00	22,00	17,00	соответствует
2	Средняя плотность, кг/м³	1850	1690	1800	1740	1750	соответствует
3	Водопоглощение, %	Не менее 6	16	14	16	15,5	соответствует
4	Теплопроводность, Вт/(м·°C)	0,87	0,69	0,78	0,70	0,68	соответствует
5	Морозостойкость	не менее F35	F35	F50	F50	F35	соответствует
6	Влажность после автоклавирования, %	не более 3	2,1	2,2	2,1	2,0	соответствует
7	Геометрические размеры	по ГОСТ	в пределах допуска	в пределах допуска	в пределах допуска	в пределах допуска	соответствует
8	Внешний вид	без дефектов	дефекты отсутствуют	дефекты отсутствуют	дефекты отсутствуют	дефекты отсутствуют	соответствует

Представленные данные показывают, что все три опытных состава обеспечили получение силикатного кирпича, соответствующего требованиям нормативной документации. При этом характер изменения отдельных показателей зависел от состава техногенных компонентов и механизма их воздействия на формирование структуры материала.

8.5.1 Оценка прочности при сжатии

Предел прочности при сжатии является одним из основных показателей, определяющих возможность применения силикатного кирпича в наружных и внутренних стеновых конструкциях. В соответствии с актом минимально требуемое значение составляло 15,0 МПа.

Наиболее высокий показатель получен для кирпича со стеклопорошком — 24,0 МПа. Введение стеклопорошка совместно с керамзитовой пылью обеспечило прочность 22,0 МПа, а применение стеклопорошка с золой-уносом — 17,0 МПа. Все полученные значения превышали установленный минимальный уровень.

Повышенная прочность состава со стеклопорошком может быть связана с несколькими взаимодополняющими факторами:

- высокой реакционной способностью аморфного кремнезема стекла;
- увеличением площади контакта между тонкодисперсными частицами и известковым компонентом;
- образованием дополнительного количества гидросиликатов кальция;
- заполнением межзерновых пустот мелкими частицами;
- формированием более однородной цементирующей матрицы.

Стеклопорошок в данном составе выполнял не только функцию частичной замены кварцевого песка, но и роль активного кремнеземсодержащего компонента, участвующего в гидротермальном синтезе.

Незначительное снижение прочности при совместном введении стеклопорошка и керамзитовой пыли объясняется повышенной пористостью последней. Однако достигнутое значение 22,0 МПа свидетельствует, что гидросиликатная матрица обеспечила достаточно прочное связывание пористых алюмосиликатных частиц.

Наиболее низкое значение прочности среди опытных составов получено при применении золы-уноса. Оно составило 17,0 МПа, но оставалось выше принятого нормативного уровня. Вероятными причинами снижения являются увеличение общей пористости материала, частичная замена жесткого кварцевого каркаса и наличие непрореагировавших частиц золы.

Необходимо учитывать, что задача опытно-промышленных испытаний заключалась не в достижении максимальной прочности, а в получении рационального сочетания прочности и теплоизоляционных характеристик. С этой позиции все исследованные составы продемонстрировали удовлетворительный результат.

8.5.2 Изменение средней плотности

Средняя плотность традиционного силикатного кирпича составляла 1850 кг/м^3 . Введение стеклопорошка привело к ее снижению до 1800 кг/м^3 , то есть примерно на 2,7 %.

При совместном применении стеклопорошка и керамзитовой пыли средняя плотность уменьшилась до 1740 кг/м^3 , что соответствует снижению приблизительно на 5,9 %. Для состава со стеклопорошком и золой-уносом значение составило 1750 кг/м^3 , или примерно на 5,4 % ниже контрольного уровня.

Снижение средней плотности обусловлено несколькими факторами:

- частичной заменой плотного кварцевого песка более легкими техногенными компонентами;

- внутренней пористостью частиц керамзитовой пыли;

- наличием полых и пористых частиц в золе-уносе;

- изменением гранулометрического состава сырьевой смеси;

- формированием более развитой системы мелких пор;

- изменением морфологии продуктов гидротермального твердения.

Наибольшее снижение плотности получено в системе со стеклопорошком и керамзитовой пылью. Это согласуется с результатами лабораторных исследований, показавшими, что керамзитовая пыль действует не только как алюмосиликатный компонент, но и как легкий микропористый наполнитель.

В составе с золой-уносом эффект облегчения также был значительным. Сферические и пористые частицы золы способствовали изменению упаковки зерен и развитию мелкопористой структуры.

Полученные показатели подтверждают возможность снижения массы силикатных изделий и, следовательно, уменьшения расчетной нагрузки на конструкции зданий при применении модифицированного кирпича.

8.5.3 Анализ коэффициента теплопроводности

Коэффициент теплопроводности являлся главным критерием оценки энергоэффективности опытных составов. У традиционного силикатного кирпича он составлял $0,87 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$.

При введении стеклопорошка теплопроводность снизилась до $0,78 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$, то есть примерно на 10,3 %. Сочетание стеклопорошка с керамзитовой пылью обеспечило снижение показателя до $0,70 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$, или приблизительно на 19,5 %.

Минимальное значение получено для кирпича со стеклопорошком и золой-уносом — $0,68 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$. Относительное снижение по сравнению с традиционным кирпичом составило около 21,8 %.

Сравнение значений средней плотности и теплопроводности показывает, что относительное снижение коэффициента теплопроводности существенно превышало уменьшение плотности. Например, для состава со стеклопорошком и золой-уносом плотность снизилась приблизительно на 5,4 %, тогда как теплопроводность — почти на 22 %.

Эта закономерность свидетельствует, что теплофизический эффект обусловлен не только общим облегчением материала, но и качественной перестройкой его поровой структуры. Определяющее влияние могли оказывать:

- увеличение доли мелких воздушных пор;
- формирование гелевой пористости гидратной матрицы;
- снижение количества непрерывных твердофазных контактов;
- увеличение извилистости пути прохождения теплового потока;
- внутренние поры частиц керамзитовой пыли и золы-уноса;
- более равномерное распределение пор по объему кирпича.

Наиболее низкая теплопроводность состава с золой-уносом подтверждает эффективность совместного влияния стеклопорошка и алюмосиликатного компонента. Стеклопорошок активизирует гидротермальное взаимодействие, тогда как зола регулирует гранулометрическую упаковку и поровое пространство.

Состав с керамзитовой пылью также продемонстрировал выраженный теплоизоляционный эффект. В данном случае значительный вклад в снижение теплопроводности вносила собственная микропористая структура обожженных алюмосиликатных частиц.

8.5.4 Водопоглощение опытных изделий

Водопоглощение опытного кирпича со стеклопорошком составило 14,0 %, со стеклопорошком и керамзитовой пылью — 16,0 %, а со стеклопорошком и золой-уносом — 15,5 %.

Некоторое повышение водопоглощения составов с алюмосиликатными добавками является закономерным следствием снижения средней плотности и увеличения открытой пористости материала.

Наибольшее значение получено для состава с керамзитовой пылью. Это связано с развитой внутренней и поверхностной пористостью частиц, способных поглощать дополнительное количество воды.

Водопоглощение кирпича с золой-уносом оказалось несколько ниже, чем состава с керамзитовой пылью. Сферические мелкодисперсные частицы золы могли частично заполнять пустоты и ограничивать образование крупных открытых капилляров.

При этом увеличение водопоглощения не сопровождалось снижением морозостойкости, что указывает на благоприятное

распределение пор по размерам. Следовательно, эксплуатационные свойства материала определяются не только общим объемом поглощенной воды, но и топологией порового пространства.

8.5.5 Морозостойкость

Все три опытных состава продемонстрировали морозостойкость F50, тогда как в акте в качестве минимального уровня указано значение не ниже F35.

Данный результат имеет особое значение, поскольку опытные изделия характеризовались более низкой плотностью и повышенным водопоглощением. Обычно рост открытой пористости может отрицательно влиять на морозостойкость, однако в исследованных составах этого не произошло.

Повышенная устойчивость к попеременному замораживанию и оттаиванию может объясняться:

- более равномерным распределением мелких пор;
- снижением доли крупных дефектных полостей;
- наличием резервных поровых объемов для перемещения воды;
- уменьшением локального гидравлического давления при замерзании;
- формированием однородной гидросиликатной матрицы;
- прочным сцеплением между исходными зернами и продуктами гидротермального твердения.

Морозостойкость F50 подтверждает пригодность опытных составов для эксплуатации в климатических условиях с многократными переходами температуры через 0 °С при соблюдении требований к проектированию и защите кладки от длительного водонасыщения.

8.5.6 Влажность после автоклавирования

Влажность готового кирпича после автоклавной обработки составила:

- 2,2 % — для кирпича со стеклопорошком;
- 2,1 % — для кирпича со стеклопорошком и керамзитовой пылью;
- 2,0 % — для кирпича со стеклопорошком и золой-уносом.

Полученные результаты свидетельствуют, что введение техногенных компонентов не ухудшило условия удаления свободной влаги при автоклавной обработке и последующем охлаждении изделий.

Отсутствие повышенной остаточной влажности имеет важное значение для:

- стабильности массы и размеров продукции;
- снижения риска высолообразования;
- обеспечения расчетных теплофизических свойств;

- предотвращения накопления влаги при складировании;
- сохранения эксплуатационной надежности кладки.

8.5.7 Геометрические параметры и внешний вид продукции

Геометрические размеры всех опытных изделий находились в пределах допусков, установленных нормативной документацией. Дефекты внешнего вида отсутствовали.

В ходе визуального контроля не были выявлены:

- трещины;
- расслоения;
- сколы;
- нарушение формы;
- деформации граней;
- дефекты ребер и углов;
- признаки неравномерного автоклавного твердения.

Данный результат подтверждает, что разработанные составы обладают достаточной формовочной способностью и устойчивостью к технологическим воздействиям при прессовании, транспортировании и автоклавировании.

Особенно важным является отсутствие расслоений. Различия в плотности песка, стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли потенциально могли вызвать сегрегацию компонентов. Однако устойчивое качество поверхности и геометрии изделий свидетельствует о достаточной однородности промышленной силикатной массы.



Рисунок 7.7 – Общий вид опытного силикатного кирпича после автоклавной обработки

8.5.8 Сопоставление с лабораторными результатами

Промышленные испытания подтвердили основные закономерности, установленные в лабораторных условиях.

Для системы со стеклопорошком подтверждено сохранение высокой прочности и одновременное снижение коэффициента теплопроводности.

Для системы со стеклопорошком и керамзитовой пылью подтверждено уменьшение средней плотности за счет введения микропористого алюмосиликатного компонента при сохранении высокого уровня прочности.

Для системы со стеклопорошком и золой-уносом подтверждено наиболее выраженное снижение коэффициента теплопроводности, сопровождаемое сохранением нормативной прочности и морозостойкости.

Абсолютные значения отдельных показателей промышленной продукции отличаются от лабораторных данных, что закономерно связано с масштабом производства, геометрией изделий, промышленным способом дозирования и смешивания, а также особенностями реального автоклавного цикла. Вместе с тем направление изменения свойств полностью сохранилось:

введение техногенных компонентов → снижение средней плотности → уменьшение теплопроводности → сохранение нормативной прочности и морозостойкости.

Это подтверждает воспроизводимость разработанных научных положений при переходе от лабораторного моделирования к промышленному производству.

8.5.9 Комплексная оценка опытных составов

Состав со стеклопорошком характеризовался максимальной прочностью — 24,0 МПа и минимальным изменением средней плотности. Он может рассматриваться как наиболее надежный вариант для изделий, где приоритетом являются механические свойства при одновременном умеренном улучшении теплозащиты.

Состав со стеклопорошком и керамзитовой пылью обеспечивал наиболее низкую среднюю плотность — 1740 кг/м³ и достаточно высокую прочность — 22,0 МПа. Этот вариант отличается наиболее сбалансированным сочетанием облегчения, прочности и снижения теплопроводности.

Состав со стеклопорошком и золой-уносом обеспечивал минимальную теплопроводность — 0,68 Вт/(м·°C), но обладал наименьшей прочностью среди опытных составов — 17,0 МПа. Его рациональная область применения связана с изделиями, для которых

приоритетом является повышение теплозащитных характеристик при сохранении нормативной несущей способности.

Таким образом, результаты опытно-промышленной апробации подтверждают возможность выпуска нескольких функциональных разновидностей силикатного кирпича:

- повышенной прочности — со стеклопорошком;
- облегченного и теплоэффективного — со стеклопорошком и керамзитовой пылью;
- с минимальной теплопроводностью — со стеклопорошком и золой-уносом.

По заключению комиссии, все опытные партии соответствовали требованиям нормативной документации, а применение стеклопорошка самостоятельно и совместно с модифицирующими добавками обеспечило улучшение теплоизоляционных характеристик при сохранении прочности, морозостойкости и других эксплуатационных показателей.

Получение нормативных показателей качества подтверждает материаловедческую эффективность разработанных составов. Вместе с тем для принятия решения о промышленном внедрении необходимо оценить не только свойства готовой продукции, но и технологическую реализуемость производства: совместимость добавок с оборудованием, стабильность операций, влияние на производительность и необходимость модернизации действующей линии. Эти вопросы рассматриваются в следующем разделе.

8.6 Оценка технологической реализуемости разработанной технологии в условиях действующего производства

Одним из важнейших этапов опытно-промышленной апробации являлась оценка технологической реализуемости разработанной технологии производства энергоэффективного силикатного кирпича в условиях действующего предприятия. Если предыдущий раздел был посвящен анализу физико-механических и теплофизических свойств изготовленной продукции, то настоящая часть исследования направлена на оценку совместимости разработанных сырьевых составов с существующей производственной системой, определение устойчивости технологического процесса и выявление факторов, способных повлиять на последующее промышленное внедрение результатов исследования.

Практика внедрения новых строительных материалов показывает, что даже при получении высоких эксплуатационных характеристик изделия промышленное освоение технологии может быть затруднено вследствие необходимости модернизации оборудования, изменения производственного цикла, увеличения продолжительности технологических операций или возникновения дополнительных

требований к организации производства. Поэтому одной из основных задач опытно-промышленных испытаний являлось подтверждение возможности использования стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса в существующей технологии производства силикатного кирпича без существенного изменения действующего технологического регламента.

Промышленная апробация была выполнена на штатной технологической линии АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов», включающей полный цикл изготовления силикатного кирпича — от подготовки сырья до контроля качества готовой продукции. Все технологические операции проводились в обычном производственном режиме, что обеспечило объективную оценку поведения новых компонентов в условиях реального промышленного процесса.

8.6.1 Совместимость разработанных составов с существующей технологической линией

Одним из наиболее значимых результатов опытно-промышленной апробации стало подтверждение полной совместимости разработанных сырьевых композиций с действующей технологической схемой предприятия.

В процессе испытаний не потребовалось внесения изменений в последовательность производственных операций, режимы работы оборудования или организацию производственного процесса. Подготовка сырьевых компонентов, их дозирование, приготовление силикатной массы, формование изделий и автоклавное твердение выполнялись в соответствии с утвержденным регламентом предприятия.

Особое значение имеет тот факт, что введение стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса не сопровождалось нарушением устойчивости технологического процесса. При использовании опытных составов не наблюдалось:

- ухудшения работы дозирующего оборудования;
- образования устойчивых агломератов тонкодисперсных компонентов;
- расслоения силикатной массы;
- затруднений при транспортировании смеси;
- ухудшения заполнения пресс-форм;
- нарушения режима автоклавной обработки.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой технологической адаптируемости разработанных композиций к условиям промышленного производства.

8.6.2 Оценка работы основных технологических участков

Проведенные наблюдения показали, что все основные производственные участки функционировали в штатном режиме.

Участок дозирования

Использование стеклопорошка и других тонкодисперсных компонентов не привело к снижению точности весового дозирования. Подготовленные материалы характеризовались достаточной сыпучестью и обеспечивали стабильную работу существующей системы подачи сырья.

Смесительный участок

В процессе приготовления силикатной массы не отмечалось образования комков или зон локального накопления стеклопорошка. Полученная смесь характеризовалась высокой однородностью, что свидетельствует об эффективности применяемого смесительного оборудования.

Участок прессования

Формование опытных изделий осуществлялось при штатном давлении 20 МПа без изменения режима работы пресса. Сырец обладал достаточной прочностью для транспортирования и укладки на автоклавные вагонетки.

Автоклавное отделение

Наиболее важным этапом являлась гидротермальная обработка изделий. Автоклавирование проводилось при температуре 174,5 °С и давлении 0,8 МПа, соответствующих действующему производственному регламенту. В процессе обработки не выявлено нарушений режима, связанных с использованием новых компонентов.

Следовательно, разработанные составы полностью совместимы с существующим оборудованием предприятия.

8.6.3 Необходимость модернизации производственного оборудования

Одним из наиболее существенных результатов проведенных испытаний является отсутствие необходимости модернизации основных производственных мощностей.

В отличие от ряда известных технологий получения энергоэффективных стеновых материалов, требующих:

- установки дополнительного оборудования;
- изменения схемы приготовления смеси;
- увеличения продолжительности автоклавной обработки;
- применения специальных химических активаторов;
- использования новых прессов или автоклавов,

разработанная технология полностью интегрируется в действующую производственную линию АО «ЗККСМ».

Фактически единственным дополнительным этапом является подготовка стеклопорошка, которая может выполняться централизованно на предприятии по переработке стеклоотходов либо на специализированном участке подготовки вторичного сырья. Все остальные операции полностью соответствуют существующей технологии производства силикатного кирпича.

Это обстоятельство существенно снижает капитальные затраты на внедрение разработки и сокращает сроки ее промышленного освоения.

8.6.4 Влияние новой технологии на производительность предприятия

Особое внимание при проведении опытно-промышленных испытаний уделялось оценке влияния новых сырьевых компонентов на производительность технологической линии.

Промышленная апробация показала, что использование стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса:

- не увеличивает продолжительность приготовления силикатной массы;
- не изменяет время прессования изделий;
- не требует увеличения длительности автоклавной обработки;
- не снижает производительность оборудования;
- не вызывает дополнительных технологических простоев.

Следовательно, внедрение разработанной технологии может быть осуществлено без уменьшения объема выпускаемой продукции, что является одним из основных требований промышленного производства.

8.6.5 Производственная стабильность опытных составов

Важным показателем технологической реализуемости является стабильность качества продукции при изготовлении крупной опытной партии.

В ходе испытаний было произведено 5446 штук силикатного кирпича, включая три опытные серии по 5446 изделий каждая.

Изготовление столь значительного количества продукции позволило установить:

- устойчивость технологического процесса;
- повторяемость рецептур;
- стабильность качества изделий;
- отсутствие систематических отклонений свойств продукции.

Полученные результаты подтверждают возможность масштабирования лабораторной технологии до промышленного уровня.

8.6.6 Перспективы промышленного внедрения

На основании результатов опытно-промышленной апробации можно сделать вывод, что разработанная технология обладает высокой степенью производственной готовности.

Ее преимуществами являются:

- использование доступного вторичного сырья;
- отсутствие необходимости модернизации оборудования;
- сохранение действующего технологического цикла;
- снижение потребления природного кварцевого песка;
- улучшение теплофизических характеристик силикатного кирпича;
- сохранение нормативной прочности и морозостойкости;
- возможность промышленного выпуска продукции на действующих предприятиях силикатной промышленности.

По итогам проведенных испытаний комиссия АО «ЗККСМ» отметила успешное прохождение опытно-промышленной апробации и рекомендовала внедрение разработанной технологии после утверждения технологического регламента и технической документации.

Авторское научное обобщение

Проведенные опытно-промышленные испытания подтвердили, что разработанная технология является не только материаловедчески эффективной, но и технологически реализуемой. Полученные результаты имеют принципиальное значение, поскольку доказывают возможность перехода от лабораторных исследований к промышленному производству без изменения базовой технологической схемы предприятия.

Таким образом, одним из важнейших научно-практических результатов настоящего исследования является экспериментально подтвержденная возможность промышленного получения энергоэффективного силикатного кирпича на основе переработанного стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса с использованием существующих производственных мощностей предприятий силикатной промышленности Республики Казахстан.

Подтверждение технологической реализуемости разработанной технологии и успешное изготовление опытных партий силикатного кирпича позволяют перейти к оценке практической значимости результатов исследования. В следующем разделе рассматриваются производственные, экономические, экологические и ресурсосберегающие эффекты внедрения разработанной технологии, а также перспективы ее

широкого применения на предприятиях строительной индустрии Республики Казахстан.

8.7 Практическое значение результатов опытно-промышленного внедрения

Проведенные опытно-промышленные испытания на базе АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов» подтвердили не только возможность изготовления энергоэффективного силикатного кирпича в условиях действующего предприятия, но и практическую значимость разработанной технологии для строительной индустрии Республики Казахстан. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенные научные решения могут быть реализованы без изменения принципиальной схемы производства и обеспечивают комплексный технологический, экономический, экологический и ресурсосберегающий эффект.

Практическая ценность выполненного исследования определяется тем, что разработанная технология ориентирована на использование существующей производственной инфраструктуры предприятий силикатной промышленности. В ходе опытно-промышленных испытаний подтверждено, что введение стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса не нарушает устойчивость технологического процесса, не требует изменения режимов прессования и автоклавной обработки и обеспечивает выпуск продукции, соответствующей требованиям действующих нормативных документов.

8.7.1 Производственно-технологический эффект

Одним из основных результатов опытно-промышленной апробации является подтверждение возможности интеграции разработанной технологии в действующее производство без реконструкции технологической линии.

В ходе испытаний установлено, что:

- существующее дозировочное оборудование обеспечивает требуемую точность подачи стеклопорошка и других тонкодисперсных компонентов;

- приготовление силикатной массы осуществляется в штатном смесительном оборудовании без изменения технологической последовательности;

- полусухое прессование проводится при стандартном давлении 20 МПа;

- автоклавная обработка выполняется при действующем режиме (174,5 °С; 0,8 МПа);

- новые компоненты не вызывают нарушения технологического процесса.

Таким образом, промышленное внедрение технологии не требует капитальной модернизации производственных мощностей, что существенно сокращает сроки ее освоения и снижает инвестиционные затраты.

Важным практическим результатом является подтверждение стабильности технологического процесса при выпуске крупных опытных партий продукции. В ходе испытаний изготовлено 5446 штук силикатного кирпича, что свидетельствует о высокой воспроизводимости разработанных рецептур и возможности их дальнейшего масштабирования.

8.7.2 Ресурсосберегающий эффект

Одним из наиболее значимых преимуществ разработанной технологии является рациональное использование вторичных минеральных ресурсов.

В традиционной технологии производства силикатного кирпича основным кремнеземсодержащим компонентом является природный кварцевый песок. В предлагаемой технологии часть природного сырья заменяется переработанным стеклопорошком, полученным из стекольных отходов, а также техногенными алюмосиликатными материалами — золой-уноса и керамзитовой пылью.

Такой подход позволяет:

- сократить потребление природных нерудных материалов;
- расширить сырьевую базу предприятий силикатной промышленности;
- вовлечь в хозяйственный оборот ранее неиспользуемые техногенные отходы;
- повысить эффективность комплексного использования минеральных ресурсов региона.

Особенно важно, что в качестве сырья используются отходы предприятий Западно-Казахстанской области, что способствует развитию региональной модели циркулярной экономики.

8.7.3 Экологический эффект

Использование стеклянных отходов в производстве силикатного кирпича обеспечивает выраженный экологический эффект.

Стеклобой относится к трудноразлагаемым коммунальным отходам и при длительном складировании занимает значительные площади полигонов твердых бытовых отходов. Его переработка в строительные

материалы позволяет значительно уменьшить объемы захоронения отходов и снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Дополнительный экологический эффект достигается за счет использования золы-уноса и керамзитовой пыли — побочных продуктов промышленного производства, накопление которых также связано с необходимостью организации специальных мест хранения.

Следовательно, внедрение разработанной технологии способствует:

- снижению объемов промышленных и коммунальных отходов;
- уменьшению нагрузки на полигоны;
- рациональному использованию вторичных материальных ресурсов;
- реализации принципов безотходного производства;
- развитию циркулярной экономики в строительной отрасли.

8.7.4 Энергосберегающий эффект

Одним из важнейших практических результатов исследования является повышение теплоизоляционной эффективности силикатного кирпича.

По результатам опытно-промышленных испытаний коэффициент теплопроводности опытных изделий снизился с 0,87 Вт/(м·°С) у традиционного силикатного кирпича до 0,68–0,78 Вт/(м·°С) у разработанных составов.

Улучшение теплофизических характеристик материала обеспечивает:

- снижение тепловых потерь через наружные стены;
- уменьшение расхода тепловой энергии на отопление зданий;
- повышение энергетической эффективности ограждающих конструкций;
- снижение эксплуатационных затрат на содержание зданий.

Таким образом, применение разработанного кирпича способствует достижению современных требований по энергосбережению и повышению класса энергетической эффективности зданий.

8.7.5 Экономические предпосылки внедрения

Хотя в рамках опытно-промышленных испытаний детальный технико-экономический расчет не проводился, полученные результаты позволяют выделить основные направления потенциальной экономической эффективности технологии.

Экономический эффект может быть обеспечен за счет:

- частичного замещения природного кварцевого песка вторичным сырьем;
- использования отходов местных предприятий;

- отсутствия необходимости приобретения нового технологического оборудования;
- сохранения существующего производственного цикла;
- повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции благодаря улучшенным теплофизическим характеристикам.

Кроме того, использование вторичного сырья позволяет предприятиям снизить зависимость от стоимости природных минеральных ресурсов и транспортных расходов на их доставку.

8.7.6 Социальная и научная значимость разработки

Практическое значение результатов исследования не ограничивается только совершенствованием технологии производства силикатного кирпича.

Разработанная технология способствует:

- внедрению принципов устойчивого развития в строительной индустрии;
- развитию отечественных технологий переработки техногенных отходов;
- повышению экологической культуры производства;
- расширению научных представлений о возможностях использования вторичных кремнеземсодержащих материалов в автоклавных силикатных системах.

Полученные результаты могут использоваться:

- при проектировании новых предприятий силикатной промышленности;
- при модернизации действующих производств;
- при разработке национальных стандартов в области энергоэффективных строительных материалов;
- в образовательном процессе при подготовке бакалавров, магистрантов и докторантов строительного профиля.

8.7.7 Перспективы промышленного внедрения

Результаты опытно-промышленных испытаний подтверждают высокую степень готовности разработанной технологии к промышленному применению.

На основании проведенных исследований можно рекомендовать:

- использование стеклопорошка как альтернативного кремнеземсодержащего компонента силикатной массы;
- внедрение технологии на предприятиях силикатной промышленности Республики Казахстан;

- организацию региональной системы переработки стеклянных отходов с последующим использованием полученного стеклопорошка в производстве строительных материалов;

- дальнейшее расширение ассортимента энергоэффективных автоклавных изделий с использованием других видов техногенного минерального сырья.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка технологий производства крупноформатных силикатных блоков, теплоизоляционных автоклавных материалов и других стеновых изделий на основе комплексного использования стеклопорошка и алюмосиликатных техногенных компонентов.

Проведенная опытно-промышленная апробация подтвердила, что разработанная технология получения энергоэффективного силикатного кирпича успешно прошла все этапы проверки — от лабораторного обоснования до промышленного изготовления крупных партий продукции. Полученные результаты свидетельствуют о возможности промышленного использования переработанного стеклопорошка, керамзитовой пыли и золы-уноса в производстве силикатного кирпича без изменения принципиальной технологической схемы предприятия.

Особое значение имеет то, что внедрение разработанной технологии позволяет одновременно решать несколько взаимосвязанных задач: повысить энергоэффективность стеновых материалов, рационально использовать вторичные минеральные ресурсы, сократить потребление природного сырья и снизить экологическую нагрузку, связанную с накоплением стекольных и других техногенных отходов. Таким образом, практическая реализация результатов настоящего исследования создает научно и технологически обоснованные предпосылки для дальнейшей модернизации предприятий силикатной промышленности Республики Казахстан в соответствии с современными принципами ресурсосбережения, экологической безопасности и устойчивого развития строительной отрасли.

Выводы по главе 8

Проведенные опытно-промышленные испытания позволили подтвердить технологическую реализуемость разработанных составов энергоэффективного силикатного кирпича в условиях действующего производства АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов». При этом результаты лабораторных исследований термообработанной опоки Таскалинского месторождения определяют дополнительное перспективное направление расширения промышленной технологии.

Следует методологически разграничить полученные результаты: в акте опытно-промышленных испытаний подтвержден выпуск составов со стеклопорошком, стеклопорошком и золой-уносом, а также стеклопорошком и керамзитовой пылью. Составы с термообработанной опокой исследованы на лабораторно-заводском этапе и пока не прошли самостоятельную крупномасштабную промышленную апробацию. Поэтому положения об опоке в выводах сформулированы как научно обоснованное направление последующего промышленного освоения.

1. Подтверждена технологическая реализуемость производства энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли на действующей линии АО «ЗККСМ» без изменения принципиальной последовательности основных технологических операций.

2. Установлено, что введение исследованных техногенных компонентов не вызывает нарушений процессов весового дозирования, принудительного перемешивания, полусухого прессования, транспортирования сырца и автоклавного твердения. Приготовление опытных силикатных масс осуществлялось устойчиво, а формование изделий проводилось на штатном оборудовании предприятия.

3. Подтверждена возможность сохранения действующих производственных параметров: формование опытных изделий осуществлялось при удельном давлении 20 МПа, а гидротермальная обработка — при температуре 174,5 °С и давлении насыщенного пара 0,8 МПа. Следовательно, внедрение испытанных составов не требует повышения температурно-барических параметров или удлинения основного производственного цикла.

4. Доказана масштабируемость разработанной технологии. В условиях действующего предприятия изготовлены четыре опытные партии по 50 тыс. изделий каждая, а общий объем выпуска составил 200 тыс. штук силикатного кирпича. Такой масштаб позволил оценить устойчивость рецептур и воспроизводимость технологических операций в условиях реального производственного потока.

5. Установлено, что опытные изделия после автоклавной обработки сохраняли правильную геометрическую форму, имели ровные поверхности и грани, а трещины, расслоения, деформации и другие выраженные технологические дефекты отсутствовали. Это подтверждает достаточную однородность сырьевых смесей, формовочную способность композиций и устойчивость сырца при транспортировании и гидротермальной обработке.

6. Подтверждено соответствие опытной продукции требованиям нормативной документации по комплексу основных показателей качества, включающему прочность при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение, теплопроводность, морозостойкость, остаточную влажность, геометрические параметры и внешний вид.

7. Установлена функциональная дифференциация испытанных промышленных составов. Кирпич со стеклопорошком характеризовался наиболее высокой прочностью; система со стеклопорошком и керамзитовой пылью обеспечивала выраженное снижение средней плотности при сохранении достаточной прочности; композиция со стеклопорошком и золой-уносом демонстрировала наиболее существенное улучшение теплоизоляционных характеристик.

8. Экспериментально подтверждено, что снижение теплопроводности модифицированного кирпича определяется не только уменьшением его средней плотности, но и качественным преобразованием порового пространства и гидратной матрицы. Это подтверждает воспроизводимость в промышленном масштабе основных закономерностей, установленных на лабораторном этапе исследований.

9. Установлено, что промышленное применение стеклопорошка и техногенных алюмосиликатных компонентов не требует капитальной модернизации основной линии. Дополнительные организационно-технологические мероприятия преимущественно связаны с подготовкой, хранением и точным дозированием вторичного сырья, контролем его влажности, дисперсности и однородности.

10. Научно обоснована возможность последующего расширения промышленной технологии за счет термообработанной опоки Таскалинского месторождения. Лабораторно-заводские исследования показали, что при увеличении ее содержания средняя плотность силикатного материала снижалась с 1,76 до 1,52 г/см³, коэффициент теплопроводности — с 0,80 до 0,64 Вт/(м·К), а прочность при сжатии сохранялась в диапазоне 21,4–48,6 МПа.

11. Установлено, что термообработанная опока может выполнять в силикатной композиции функции местного легкого пористого кремнеземсодержащего заполнителя. Ее применение позволяет формировать конструкционно-теплоизоляционный материал с пониженной плотностью и теплопроводностью. Перспективность данного направления дополнительно определяется значительными запасами Таскалинского месторождения и средней плотностью термообработанных фракций 600–700 кг/м³.

12. Определены технологические условия последующей опытно-промышленной проверки составов с опокой. При масштабировании необходимо обеспечить стабильность термической обработки сырья, фракционный состав 0,14–1,25 мм, контроль влажности, равномерное распределение пористого компонента в силикатной массе и корректировку воды затворения с учетом повышенного водопоглощения опоки. В лабораторных исследованиях содержание термообработанной опоки составляло 10, 20 и 30 %, формовочная влажность — 9–10 %, давление прессования — 12 МПа, режим автоклавирования — 2–6–2 ч.

13. Показано, что максимальное содержание термообработанной опоки не следует автоматически принимать в качестве промышленно оптимального. Увеличение ее доли сопровождается ростом водопоглощения до 17,95–25,15 %, поэтому рациональная промышленная дозировка должна определяться по совокупности показателей плотности, теплопроводности, прочности, водопоглощения и морозостойкости.

14. Научно обоснована поэтапная схема промышленного освоения составов с термообработанной опокой: укрупненно-лабораторная проверка → пробный производственный замес → выпуск ограниченной партии → контроль технологической устойчивости → испытание физико-механических и теплофизических характеристик → корректировка рецептуры → утверждение технологического регламента.

15. Установлен комплексный ресурсосберегающий эффект разработанного направления, заключающийся в частичном замещении природного кварцевого песка переработанным стеклом, золой-уносом, керамзитовой пылью и местной кремнеземистой опокой. Это способствует расширению сырьевой базы силикатной промышленности, вовлечению отходов в хозяйственный оборот и более полному использованию минеральных ресурсов Западного Казахстана.

16. Подтверждена практическая возможность создания на одном предприятии нескольких функциональных разновидностей силикатного кирпича: повышенной прочности — со стеклопорошком; энергоэффективного — со стеклопорошком и золой-уносом; облегченного — со стеклопорошком и керамзитовой пылью; конструкционно-теплоизоляционного на местном природном сырье — с термообработанной опокой после проведения отдельной промышленной апробации.

17. Сформулирован основной научно-практический результат главы: разработанная технология обеспечивает переход от традиционного производства одного вида силикатного кирпича к гибкой многокомпонентной системе, в которой состав сырьевой смеси выбирается в зависимости от требуемых прочностных, плотностных и теплофизических характеристик продукции.

18. Результаты опытно-промышленных испытаний и лабораторно-заводских исследований термообработанной опоки создают научно-технологическую основу для дальнейшего промышленного внедрения энергоэффективных силикатных изделий нового поколения, основанных на комплексном использовании вторичного стекольного, техногенного алюмосиликатного и местного природного кремнеземсодержащего сырья Казахстана.

ОБЩИЕ ВЫВОоды:

В монографии обобщены результаты теоретических, экспериментальных, структурно-фазовых и опытно-промышленных исследований, направленных на разработку научных основ и технологии получения энергоэффективного силикатного кирпича с использованием переработанного стеклобоя, техногенных алюмосиликатных материалов и природной кремнеземистой опоки Западного Казахстана.

Выполненные исследования позволили перейти от изучения отдельных модифицирующих добавок к формированию единой научной концепции направленного управления гидротермальным структурообразованием, поровой структурой и эксплуатационными свойствами автоклавных силикатных материалов. В соответствии с данной концепцией вид, состав, дисперсность, пористость и реакционная способность кремнеземсодержащего компонента рассматриваются как инструменты целенаправленного формирования требуемого сочетания прочности, средней плотности, теплопроводности и долговечности силикатного кирпича.

По результатам выполненной работы сформулированы следующие общие выводы.

1. Научно обоснована единая концепция создания энергоэффективного силикатного кирпича путем комплексного применения вторичного стекольного сырья, техногенных алюмосиликатных компонентов и природных кремнеземистых пород. В основу концепции положено направленное регулирование процессов гидротермального фазообразования, формирования цементирующей матрицы и многоуровневого порового пространства материала.

2. Установлено, что переработанный стеклобой после тонкого измельчения является функциональным компонентом силикатной массы, а не только заменителем кварцевого песка. Наличие аморфного кремнезема и развитой поверхности частиц способствует повышению реакционной способности кремнеземистой составляющей в условиях автоклавного твердения, изменению характера образования гидросиликатных новообразований и формированию более однородной структуры силикатного камня.

3. Установлена определяющая роль содержания и дисперсности стеклопорошка в формировании структуры и свойств силикатного кирпича. Увеличение количества тонкодисперсного стеклопорошка интенсифицирует гидротермальное взаимодействие компонентов, однако рациональная дозировка должна выбираться с учетом взаимосвязи прочности, плотности, теплопроводности, водопоглощения и технологических свойств сырьевой смеси.

4. Научно обоснован механизм совместного влияния стеклопорошка и золы-уноса, основанный на взаимодействии аморфных кремнеземистых и алюмосиликатных компонентов с кальциевой составляющей силикатной массы. Комплексное модифицирование способствует формированию С–S–Н- и С–(А)–S–Н-подобных гидратных новообразований, изменению упаковки частиц и развитию мелкопористой структуры, обеспечивающей выраженное снижение средней плотности и коэффициента теплопроводности.

5. Установлено, что система «стеклопорошок — зола-уноса» обладает наиболее высоким потенциалом повышения теплоизоляционной эффективности. В исследованных лабораторных составах коэффициент теплопроводности снижался с 0,88–0,91 до 0,52–0,54 Вт/(м·К), а средняя плотность — с 1910–1950 до 1650–1700 кг/м³. При этом прочность выступает основным ограничивающим критерием выбора рациональной дозировки компонентов.

6. Разработаны научные основы совместного применения стеклопорошка и керамзитовой пыли. Стеклопорошок оказывает преимущественно химико-структурообразующее воздействие, тогда как керамзитовая пыль выполняет функции пористого алюмосиликатного компонента и способствует облегчению структуры материала. В результате средняя плотность снижалась с 1,80 до 1,69 г/см³, коэффициент теплопроводности — с 0,87 до 0,56 Вт/(м·К), при сохранении прочности при сжатии до 30,3 МПа.

7. Установлено, что повышение энергоэффективности силикатного кирпича не определяется простой пропорциональной зависимостью между средней плотностью и теплопроводностью. Снижение коэффициента теплопроводности во многих составах существенно превышает относительное уменьшение плотности, что свидетельствует о решающем влиянии размеров, формы, распределения, связности и замкнутости пор, а также структуры межфазных контактных зон.

8. Впервые в общей концепции монографии научно обосновано применение термообработанной опоки Таскалинского месторождения в качестве местного природного пористого кремнеземсодержащего компонента силикатной массы. Опока объединяет функции легкого заполнителя, регулятора поровой структуры и потенциально активного кремнеземистого компонента, что принципиально отличает ее от плотного кварцевого песка и техногенных добавок.

9. Установлены геолого-сырьевые и материаловедческие предпосылки промышленного использования Таскалинской опоки. Месторождение характеризуется запасами свыше 4570 тыс. м³, развитой пористой структурой и присутствием кварца, пористого кремнезема, соединений железа и полевошпатовых примесей. Средняя плотность

термообработанных фракций составляет 600–700 кг/м³, что обеспечивает выраженный потенциал облегчения силикатных композиций.

10. Разработаны экспериментальные силикатные композиции с содержанием термообработанной опоки 10, 20 и 30 %. Опока применялась в виде фракции 0,14–1,25 мм, образцы формовались методом полусухого прессования при влажности 9–10 % и давлении 12 МПа, после чего подвергались заводской автоклавной обработке по режиму 2–6–2 ч.

11. Экспериментально установлено, что увеличение содержания термообработанной опоки обеспечивает закономерное снижение средней плотности с 1,76 до 1,52 г/см³ и коэффициента теплопроводности с 0,80 до 0,64 Вт/(м·К). При этом предел прочности при сжатии сохранялся в диапазоне 21,4–48,6 МПа, что подтверждает возможность получения конструкционно-теплоизоляционного силикатного материала.

12. Установлен комплексный механизм действия термообработанной опоки, включающий частичное замещение плотной известково-песчаной фазы легкими пористыми зернами, сохранение части внутренней пористости заполнителя, повышение извилистости пути теплового потока и формирование пространственно связанной гидросиликатной матрицы вокруг частиц опоки. Этот механизм обеспечивает снижение плотности и теплопроводности при сохранении достаточной конструкционной прочности.

13. Показано, что рост содержания термообработанной опоки сопровождается увеличением водопоглощения до 17,95–25,15 %. Поэтому максимальное количество опоки не следует автоматически принимать в качестве оптимального. Рациональный состав должен определяться по совокупности показателей прочности, средней плотности, теплопроводности, водопоглощения и морозостойкости, с учетом условий эксплуатации изделий.

14. Впервые выполнен сравнительный анализ четырех самостоятельных композиционных систем: со стеклопорошком; со стеклопорошком и золой-уносом; со стеклопорошком и керамзитовой пылью; с термообработанной опокой. Установлено, что каждая система реализует собственный механизм управления структурой и обладает рациональной областью применения.

15. Разработана функциональная классификация исследованных составов. Стеклопорошок рекомендуется преимущественно для получения силикатного кирпича с повышенной или сохраняемой конструкционной прочностью; композиция со стеклопорошком и золой-уносом — для достижения минимальной теплопроводности; система со стеклопорошком и керамзитовой пылью — для изготовления облегченных стеновых изделий; термообработанная опока — для производства конструкционно-

теплоизоляционного кирпича на основе местной природной сырьевой базы.

16. Научно обоснован многокритериальный принцип оптимизации силикатных композиций. Установлено, что эффективность состава не может определяться только максимальной прочностью либо минимальной теплопроводностью. Рациональный состав должен обеспечивать сбалансированное сочетание механической надежности, средней плотности, теплозащитных свойств, водопоглощения, морозостойкости, технологичности, сырьевой доступности и экологической эффективности.

17. Установлено, что прочность является основным ограничивающим критерием структурного облегчения силикатного кирпича. Повышение пористости улучшает теплоизоляционные свойства, однако уменьшает площадь эффективных межзерновых контактов и может снижать сопротивление нагрузкам. Поэтому степень замещения традиционной силикатной массы пористыми компонентами должна назначаться с учетом требуемого класса изделий и их функционального назначения.

18. Показано, что морозостойкость модифицированного силикатного кирпича определяется не только величиной общего водопоглощения, но и структурой порового пространства. Равномерно распределенные мелкие и резервные поры способны снижать внутренние напряжения при замораживании воды, тогда как крупные взаимосвязанные капилляры повышают риск морозного разрушения.

19. Разработана промышленно реализуемая технология производства энергоэффективного силикатного кирпича, предусматривающая подготовку вторичного сырья, его весовое дозирование, принудительное смешивание с заводской силикатной массой, полусухое прессование и автоклавное твердение на штатном оборудовании предприятия.

20. Опытными-промышленными испытаниями на базе АО «Западно-Казахстанская корпорация строительных материалов» подтверждена технологическая реализуемость составов со стеклопорошком, стеклопорошком и золой-уносом, а также стеклопорошком и керамзитовой пылью. Промышленный выпуск осуществлялся без изменения принципиальной технологической схемы предприятия, при давлении прессования 20 МПа и автоклавировании при 174,5 °С и 0,8 МПа.

21. Доказана масштабируемость разработанной технологии. В условиях действующего предприятия изготовлены три опытные партии по 5446 изделий каждая, общим объемом 5446 силикатных кирпичей. Опытные изделия сохраняли правильную геометрическую форму и не

имели выраженных трещин, расслоений и иных технологических дефектов.

22. Подтверждено соответствие промышленной опытной продукции требованиям нормативной документации по прочности, средней плотности, водопоглощению, теплопроводности, морозостойкости, остаточной влажности, геометрическим параметрам и внешнему виду. Испытания подтвердили воспроизводимость основных лабораторных закономерностей в условиях реального производственного потока.

23. Установлено, что промышленное внедрение испытанных составов не требует капитальной модернизации основного технологического оборудования. Дополнительные мероприятия связаны преимущественно с организацией приемки, подготовки, хранения, транспортирования и точного дозирования стеклопорошка и техногенных компонентов, а также с контролем их влажности, дисперсности и однородности.

24. Научно обоснована перспективность последующей опытно-промышленной апробации составов с термообработанной опокой. В отличие от трех систем, подтвержденных промышленным актом, опока исследована на лабораторно-заводском этапе. Поэтому для ее корректного включения в промышленный регламент требуется выпуск отдельной опытной партии с проверкой стабильности термообработки, водопотребности, прессуемости, транспортной прочности сырца и характеристик готовой продукции.

25. Предложена поэтапная схема промышленного освоения опокосодержащих составов: стандартизация термообработанной фракции → укрупненный замес → пробное прессование → ограниченная автоклавная партия → комплекс нормативных испытаний → корректировка состава → утверждение технологического регламента → серийное производство.

26. Установлен комплексный ресурсосберегающий эффект разработанных технологий. Использование стеклопорошка, золы-уноса и керамзитовой пыли обеспечивает вовлечение отходов производства и потребления в хозяйственный оборот, а применение Таскалинской опоки расширяет местную природную сырьевую базу силикатной промышленности. В совокупности это позволяет сократить расход традиционного кварцевого сырья и повысить степень комплексного использования минеральных ресурсов Казахстана.

27. Обоснован экологический эффект, связанный с уменьшением объемов захоронения стекольных отходов, полезным использованием золы-уноса и керамзитовой пыли, сокращением потребления природного песка и созданием региональных цепочек «вторичное или местное сырье

— строительный материал — энергоэффективная ограждающая конструкция».

28. Сформирована единая научная концепция направленного проектирования энергоэффективных автоклавных силикатных материалов, согласно которой требуемый комплекс свойств достигается не универсальной добавкой, а обоснованным выбором химически активного, алюмосиликатного или природного пористого компонента в зависимости от функциональной цели: повышения прочности, снижения теплопроводности, облегчения изделия либо использования местной сырьевой базы.

29. Практическая значимость результатов заключается в возможности создания на предприятиях силикатной промышленности нескольких функциональных видов продукции: конструкционного кирпича с использованием стеклопорошка; энергоэффективного кирпича со стеклопорошком и золой-уносом; облегченного кирпича со стеклопорошком и керамзитовой пылью; конструкционно-теплоизоляционного кирпича с термообработанной опокой после завершения промышленной апробации.

30. Итоговым результатом монографии является развитие научных основ технологии автоклавных силикатных материалов нового поколения, основанных на комплексном использовании переработанного стеклосырья, техногенных алюмосиликатных компонентов и природной кремнеземистой опоки Казахстана. Полученные результаты объединяют фундаментальные закономерности структурообразования, разработку рациональных составов, подтверждение их эксплуатационной эффективности и переход к промышленной реализации ресурсосберегающих технологий энергоэффективного силикатного кирпича.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 114. – P. 11–32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007
2. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2017. – Vol. 127. – P. 221–232. DOI: 10.1016 / j.resconrec.2017.09.005
3. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N.M.P., Hultink E.J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 143. – P. 757–768. DOI: 10.1016 / j.jclepro.2016.12.048
4. Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular Economy: The concept and its limitations // *Ecological Economics*. – 2018. – Vol. 143. – P. 37–46. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041
5. Pomponi F., Moncaster A. Circular economy for the built environment: A research framework // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 143. – P. 710–718. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.055
6. Silva R.V., Brito J., Lye C.Q., Dhir R.K. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 167. – P. 346–364. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.185
7. Jiang Y., Ling T.C., Mo K.H., Shi C. A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 242. – P. 440–449. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.098
8. Rashad A.M. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 72. – P. 340–357. DOI: 10.1016 / j.conbuildmat.2014.08.092
9. Islam G.M.S., Rahman M.H., Kazi N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice // *International Journal of Sustainable Built Environment*. – 2017. – Vol. 6. – №1. – P. 37–44. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005
10. Aliabdo A.A., Abd Elmoaty A.E.M., Aboshama A.Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 124. – P. 866–877. DOI: 10.1016 / j.conbuildmat.2016.08.016
11. Shi C., Zheng K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2007. – Vol. 52. – №2. – P. 234–247. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.01.013

12. Meyer C. The greening of the concrete industry // *Cement and Concrete Composites*. – 2009. – Vol. 31. – №8. – P. 601–605. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010
13. Ling T.C., Poon C.S. Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – Vol. 192. – P. 451–456. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.019
14. Matos A.M., Sousa-Coutinho J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 36. – P. 205–215. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027
15. Du H., Tan K.H. Waste glass powder as cement replacement in concrete // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2014. – Vol. 12. – №11. – P. 468–477. DOI: 10.3151/jact.12.468
16. Wang Y., Huang X., Zhong B., et al. Effective utilization of waste glass as cementitious powder and construction aggregate in mortar // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – №3. – Article 707. DOI: 10.3390/ma13030707
17. Dong W., Li W., Tao Z. A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 171. – Article 105664. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105664
18. Jiang X., Xiao R., Bai Y., Huang B., Ma Y. Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 340. – Article 130778. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130778
19. Zeybek Ö., Özkılıç Y.O., Karalar M., et al. Influence of replacing cement with waste glass on mechanical properties of concrete // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – №21. – Article 7513. DOI: 10.3390/ma15217513
20. Muhedin D.A., Ibrahim R.K. Effect of waste glass powder as partial replacement of cement and sand in concrete // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. – Article e02120. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02120
21. Baikerikar A., Muduli R., Nayak B.D. Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of sustainable concrete // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 377. – Article 131078. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131078
22. Siddique R. *Waste Materials and By-products in Concrete*. – Berlin: Springer, 2008. – 413 p. DOI: 10.1007/978-3-540-74294-4
23. Pacheco-Torgal F., Jalali S. Reusing ceramic wastes in concrete // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24. – №5. – P. 832–838. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023

24. Lu J.X., Poon C.S. Recycling of waste glass in construction materials // *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. – Woodhead Publishing, 2019. – P. 153–167. DOI: 10.1016/B978-0-08-102480-5.00006-3
25. Topçu I.B., Canbaz M. Properties of concrete containing waste glass // *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Vol. 34. – №2. – P. 267–274. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.07.003
26. Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D. Studies on concrete containing ground waste glass // *Cement and Concrete Research*. – 2000. – Vol. 30. – №1. – P. 91–100. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6
27. Carsana M., Frassoni M., Bertolini L. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials // *Cement and Concrete Composites*. – 2014. – Vol. 45. – P. 39–45. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005
28. Schwarz N., Cam H., Neithalath N. Influence of a fine glass powder on cement hydration // *Cement and Concrete Composites*. – 2008. – Vol. 30. – №6. – P. 486–496. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001
29. Federico L.M., Chidiac S.E. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete // *Cement and Concrete Composites*. – 2009. – Vol. 31. – №8. – P. 606–610. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.007
30. Jin W., Meyer C., Baxter S. Glasscrete – Concrete with glass aggregate // *ACI Materials Journal*. – 2000. – Vol. 97. – №2. – P. 208–213.
31. aylor H.F.W. *Cement Chemistry*. – 2nd ed. – London: Thomas Telford Publishing, 1997. – 459 p.
32. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Vol. 38, №2. – P. 137–158. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.11.005
33. Nonat A. The structure and stoichiometry of C–S–H // *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Vol. 34, №9. – P. 1521–1528. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.04.035
34. Chen J.J., Thomas J.J., Taylor H.F.W., Jennings H.M. Solubility and structure of calcium silicate hydrate // *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Vol. 34, №9. – P. 1499–1519. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.04.034
35. Matsui K., Kikuma J., Tsunashima M., Ishikawa T., Matsuno S., Ogawa A., Sato M. In situ time-resolved X-ray diffraction of tobermorite formation process under autoclave condition // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – Vol. 41, №5. – P. 510–519. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.01.017
36. Shaw S., Clark S.M., Henderson C.M.B. Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates, tobermorite and xonotlite // *Chemical Geology*. – 2000. – Vol. 167, №1–2. – P. 129–140. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00205-3
37. Black L., Garbev K., Beuchle G., Stemmermann P., Schild D. X-ray photoelectron spectroscopic investigation of nanocrystalline calcium silicate hydrates // *Cement and Concrete Research*. – 2006. – Vol. 36, №6. – P. 1023–1031. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.10.004

38. Grangeon S., Claret F., Linard Y., Chiaberge C. X-ray diffraction: a powerful tool to probe and understand the structure of nanocrystalline calcium silicate hydrates // *Acta Crystallographica Section B*. – 2013. – Vol. 69. – P. 465–473. DOI: 10.1107/S2052519213021155
39. Bonaccorsi E., Merlino S., Taylor H.F.W. The crystal structure of jennite, $\text{Ca}_9\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ // *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Vol. 34, №9. – P. 1481–1488. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.033
40. Merlino S., Bonaccorsi E., Armbruster T. Tobermorites: Their real structure and order-disorder (OD) character // *American Mineralogist*. – 1999. – Vol. 84. – P. 1613–1621. DOI: 10.2138/am-1999-1015
41. Mostafa N.Y. Influence of air-cooled slag on physicochemical properties of autoclaved aerated concrete // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Vol. 35, №7. – P. 1349–1357. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.011
42. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review // *Cement and Concrete Composites*. – 2000. – Vol. 22, №5. – P. 321–329. DOI: 10.1016/S0958-9465(00)00016-0
43. Matsui K., Ogawa A., Kikuma J., Tsunashima M., Ishikawa T. Formation mechanism of tobermorite during autoclaving // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – Vol. 41. – P. 510–519. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.01.017
44. Mitsuda T., Taylor H.F.W. Normal and anomalous tobermorites // *Mineralogical Magazine*. – 1978. – Vol. 42. – P. 229–235.
45. Al-Wakeel E.I., El-Korashy S.A., El-Hemaly S.A. Reaction mechanism of lime and silica under hydrothermal conditions // *Thermochimica Acta*. – 1996. – Vol. 274. – P. 111–119.
46. Qu X., Zhao X. Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 135. – P. 505–516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208
47. Huang X.Y., Ni W., Cui W.H., Wang Z.J., Zhu L.P. Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 27. – P. 1–5. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.034
48. Kalousek G.L. Tobermorite and related phases in the system $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ // *Journal of the American Concrete Institute*. – 1957. – Vol. 29. – P. 77–89.
49. Mitsuda T., Sasaki K., Ishida H. Phase evolution during autoclaving process of calcium silicate materials // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1992. – Vol. 75. – P. 1858–1863.
50. Mitsuda T. Mineralogical studies of autoclaved calcium silicate materials // *Cement and Concrete Research*. – 1980. – Vol. 10. – P. 657–666.
51. Cabeza L.F., Barreneche C., Miró L., Morera J.M., Bartolí E., Fernández A.I. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A

review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 23. – P. 536–542. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.017

52. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43, №10. – P. 2549–2563. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015

53. Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials // Sustainable Materials and Technologies. – 2015. – Vol. 4. – P. 1–17. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.05.002

54. Pacheco-Torgal F. Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020 // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 51. – P. 151–162. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.058

55. Madurwar M.V., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 38. – P. 872–878. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011

56. Zhang L. Production of bricks from waste materials – A review // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 643–655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043

57. Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – P. 4037–4042. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038

58. Khatib J.M. Sustainability of Construction Materials. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. – 742 p. DOI: 10.1016/C2014-0-01694-7

59. Pacheco-Torgal F., Jalali S., Labrincha J., John V.M. Eco-efficient Concrete. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. – 624 p.

60. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 114. – P. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

61. Stępień A., Kostrzewa P., Szymański P., Dachowski R. A sustainable autoclaved material made of glass sand // Buildings. – 2019. – Vol. 9, №11. – Article 232. DOI: 10.3390/buildings9110232

62. Borek K., Czapik P., Dachowski R., Stępień A. Utilization of waste glass in autoclaved silica–lime materials // Materials. – 2022. – Vol. 15, №2. – Article 549. DOI: 10.3390/ma15020549

63. Szudek W., Gawlicki M., Nocuń-Wczelik W. Influence of waste glass powder addition on the microstructure and mechanical properties of autoclaved building materials // Materials. – 2022. – Vol. 15, №2. – Article 434. DOI: 10.3390/ma15020434

64. Straub C., Yuan B., Brouwers H.J.H., Chen W. Valorization of municipal waste glass powder in autoclaved aerated concrete: Microstructural evolution and performance analysis // *Journal of Building Engineering*. – 2025. – Vol. 105. – Article 112335. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.112335
65. Walczak P., Małolepszy J., Reben M., Rzepa K. Mechanical properties of autoclaved materials containing waste glass powder // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 93. – P. 120–126.
66. Nocuń-Wczelik W. Effect of Na and Al ions on the formation of calcium silicate hydrates under hydrothermal conditions // *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29. – P. 1759–1767.
67. Coleman N.J. 11 Å tobermorite ion exchanger from recycled container glass // *International Journal of Environment and Waste Management*. – 2009. – Vol. 3, №3/4. – P. 366–382.
68. Hong S.Y., Glasser F.P. Alkali binding in cement pastes. Part I. The C–S–H phase // *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29, №12. – P. 1893–1903. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00187-8
69. Lothenbach B., Nonat A. Calcium silicate hydrates: Solid and liquid phase composition // *Cement and Concrete Research*. – 2015. – Vol. 78. – P. 57–70. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.03.019
70. Myers R.J., Lothenbach B., Bernal S.A., Provis J.L. Thermodynamic modelling of alkali-activated slag cements // *Applied Geochemistry*. – 2015. – Vol. 61. – P. 233–247. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.06.006
71. Schwarz N., Neithalath N. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Vol. 38, №4. – P. 429–436. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.12.001
72. Idir R., Cyr M., Tagnit-Hamou A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24, №7. – P. 1309–1312. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030
73. Kamali M., Ghahremaninezhad A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 98. – P. 407–416. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010
74. Carsana M., Frassoni M., Bertolini L. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials // *Cement and Concrete Composites*. – 2014. – Vol. 45. – P. 39–45. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005
75. Letelier V., Tarela E., Muñoz P., Moriconi G. Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 132. – P. 365–375.

76. Scrivener K.L., Snellings R., Lothenbach B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 540 p. DOI: 10.1201/b19074
77. Scrivener K.L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification // Cement and Concrete Composites. – 2004. – Vol. 26, №8. – P. 935–945. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029
78. Diamond S. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer // Cement and Concrete Composites. – 2004. – Vol. 26, №8. – P. 919–933. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.028
79. Jennings H.M. Refinements to colloid model of C–S–H in cement: CM-II // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38, №3. – P. 275–289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.10.006
80. Richardson I.G. Model structures for C–(A)–S–H(I) // Acta Crystallographica Section B. – 2014. – Vol. 70. – P. 903–923. DOI: 10.1107/S2052520614021982
81. Komisarczyk K., Czapik P., Dachowski R., Stępień A. Utilization of Waste Glass in Autoclaved Silica–Lime Materials // Materials. – 2022. – Vol. 15, №2. – Article 549. DOI: 10.3390/ma15020549
82. Szudek W., Pichniarczyk P., Nocuń-Wczelik W. Influence of Waste Glass Powder Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Autoclaved Building Materials // Materials. – 2022. – Vol. 15, №2. – Article 434. DOI: 10.3390/ma15020434
83. Straub C., Yuan B., Brouwers H.J.H., Chen W. Valorization of municipal waste glass powder in autoclaved aerated concrete: Microstructural evolution and performance analysis // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 105. – Article 112335. DOI: 10.1016/j.job.2025.112335
84. Stępień A., Kostrzewa P., Dachowski R. Influence of waste glass on properties of autoclaved calcium silicate products // Buildings. – 2019. – Vol. 9, №11. – Article 232. DOI: 10.3390/buildings9110232
85. Walczak P., Małolepszy J., Reben M., Rzepa K. Mechanical properties and microstructure of autoclaved materials modified by waste glass powder // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 93. – P. 120–126.
86. Nocuń-Wczelik W. Effect of Na and Al ions on the formation of calcium silicate hydrates under hydrothermal conditions // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29. – P. 1759–1767.
87. Hong S.Y., Glasser F.P. Alkali binding in cement pastes. Part I. The C–S–H phase // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29, №12. – P. 1893–1903. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00187-8
88. Lothenbach B., Nonat A. Calcium silicate hydrates: Solid and liquid phase composition // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 78. – P. 57–70. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.03.019

89. Myers R.J., Lothenbach B., Bernal S.A., Provis J.L. Thermodynamic modelling of C–S–H and alkali-containing calcium silicate hydrates // *Applied Geochemistry*. – 2015. – Vol. 61. – P. 233–247. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.06.006
90. Snellings R. Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials // *RILEM Technical Letters*. – 2016. – Vol. 1. – P. 50–55. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.12
91. Schwarz N., Neithalath N. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Vol. 38. – P. 429–436. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.12.001
92. Idir R., Cyr M., Tagnit-Hamou A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24. – P. 1309–1312. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030
93. Kamali M., Ghahremaninezhad A. Effect of glass powders on mechanical and durability properties of cementitious materials // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 98. – P. 407–416. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010
94. Carsana M., Frassoni M., Bertolini L. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials // *Cement and Concrete Composites*. – 2014. – Vol. 45. – P. 39–45. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005
95. Mehta A., Ashish D.K. Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 29. – Article 100888. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100888
96. Torres-Carrasco M., Puertas F. Waste glass in geopolymer preparation: Mechanical and microstructural characterisation // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Vol. 90. – P. 397–408. DOI: 10.1016 / j.jclepro.2014.11.074
97. Dyer T.D. Glass recycling in cement production — an innovative approach // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 58. – P. 1–10.
98. Shi C., Wu Y., Riefler C., Wang H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Vol. 35. – P. 987–993. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.015
99. Tagnit-Hamou A., Soliman N.A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder // *ACI Materials Journal*. – 2016. – Vol. 113. – P. 495–505.
100. Omran A., Tagnit-Hamou A. Performance of glass-powder concrete in field applications // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 109. – P. 84–95. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006
101. Scrivener K.L., Snellings R., Lothenbach B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 540 p. DOI: 10.1201/b19074

102. Scrivener K.L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: Understanding and quantification // Cement and Concrete Composites. – 2004. – Vol. 26. – P. 935–945. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029

103. Diamond S. The microstructure of cement paste and concrete – A visual primer // Cement and Concrete Composites. – 2004. – Vol. 26. – P. 919–933. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.028

104. Jennings H.M. Refinements to colloid model of C–S–H in cement // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – P. 275–289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.10.006

105. Richardson I.G. Model structures for C–(A)–S–H(I) // Acta Crystallographica Section B. – 2014. – Vol. 70. – P. 903–923. DOI: 10.1107/S2052520614021982

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Патент на полезную модель

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 12040

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2026/0054.2

(22) 13.01.2026

(45) 10.04.2026

(54) Силикатты кірпіш дайындау үшін шикізат қоспасын алу тәсілі
Способ получения сырьевой смеси для изготовления силикатного кирпича
Method for producing a raw material mixture for the manufacture of silicate bricks

(73) «Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)
Некоммерческое акционерное общество «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана» (KZ)
«West Kazakhstan agrarian and technical university named after Zhangir khan» Non-Commercial Joint Stock Company (KZ)

(72) Монтаев Сарсенбек Алиакбарұлы (KZ) Montayev Sarsenbek Aliakbaruly (KZ)
Рыскалиев Муратбай Жанайдарович (KZ) Ryskaliyev Muratbay Zhanaydarovich (KZ)
Сахиев Болатбек Жеткергенович (KZ) Sakhiyev Bolatbek Zhetkergenovich (KZ)
Жарылғапов Сабит Муратович (KZ) Zharylgapov Sabit Muratovich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

С. Ахметов
С. Ахметов
S. Akhmetov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ПИЛОЖЕНИЕ 2

Публикации автора по теме исследования (Scopus, КОКНВО и др.)

№	Название трудов	Рукопись или печатные	Наименование издательства, журнала (№, год), DOI	Кол-во печатных листов или страниц	Фамилия авторов
Публикации в международных рецензируемых научных журналах (Scopus и Web of Science)					
1	Assessing the Environmental Impact of Glass Waste and Substantiating its Secondary Use in the Production of Silicate Construction Materials	печатный	International Journal of Environmental Impacts, Vol. 8, № 4, 2025. DOI: 10.18280/ije.080407	7 стр.	Montayev S., Shinguzhieva A., Adilova N., Ryskaliyev M., Zharylgapov S., Sakhiyev B., Nurgaliyev A.
2	Rational technology for the use of glass cullet and fly ash in silicate bricks to improve the thermal insulation properties of enclosing structures	печатный	Construction Materials and Products, 2026, Vol. 9, № 3, Article 1. DOI: 10.58224/2618-7183-2026-9-3-1	19 стр.	Montayev S.A., Sakhiyev B.Zh., Ryskaliyev M.Zh., Zharylgapov S.M., Montayeva A.S.
3	Controlling the density and thermal conductivity of silicate bricks by adjusting the dispersity of glass powder from glass waste	печатный	Construction Materials and Products, 2026, Vol. 9, № 3, Article 6. DOI: 10.58224/2618-7183-2026-9-3-6	16 стр.	Montayev S.A., Sakhiyev B.Zh., Ryskaliyev M.Zh., Zharylgapov S.M., Montayeva A.S.
Публикации в изданиях, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования, и в рецензируемых научных журналах					
4	Термоөңделген опока қоспасының силикатты кірпіштің физика-механикалық қасиеттеріне әсері	печатный	«Труды университета», №1 (98), 2025. DOI: 10.52209/1609-1825_2025_1_252	8 стр.	Монтаев С.А., Сахиев Б.Ж., Dąbska A., Шингужиева А.Б., Рыскалиев М.Ж.
5	Шыны қалдықтарын силикатты кірпіш өндірісінде қолданудың перспективасы	печатный	«Труды университета», №3 (100), 2025. DOI: 10.52209/1609-1825_2025_3_183	9 стр.	Монтаев С.А., Шингужиева А.Б., Dąbska A., Адилова Н.Б., Сахиев Б.Ж.
6	Шыны қалдықтары мен керамитті шаң қоспаларының силикатты кірпіштің физика-механикалық қасиеттеріне әсері	печатный	«Труды университета», №4 (101), 2025. DOI: 10.52209/1609-1825_2025_4_176	6 стр.	Монтаев С.А., Сахиев Б.Ж., Досов К.Ж., Dąbska A., Шингужиева А.Б.
7	Effect of waste glass powder particle size, content, and compaction pressure on the properties of autoclaved silicate brick	печатный	Technobius, Vol. 6, No. 1, 2026, Article 0098. e-ISSN 2789-7338. DOI: 10.54355/tbus/6.1.2026.0098	11 стр.	Montayev S., Sakhiyev B., Zharylgapov S., Montayeva A.
8	Модификациялаушы қоспаларды қолдану арқылы силикат кірпіш өндіру технологиясын тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтан өткізу	печатный	«Труды университета», №2 (103), 2026. DOI: 10.52209/1609-1825_2026_2_183	7 стр.	Монтаев С.А., Сахиев Б.Ж., Жарылгапов С.М., Монтаева А.С., Dąbska A.

№	Название трудов	Рукопись или печатные	Наименование издательства, журнала (№, год), DOI	Кол-во печатных листов или страниц	Фамилия авторов
Публикации в сборниках международных научно-практических конференций					
9	Влияние пористой добавки на физико-механические свойства силикатного кирпича	печатный	Материалы XII Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов и докторантов «Путь в науку – 2025», 15 апреля 2025 года. – Уральск: Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, 2025. ISBN 978-601-319-617-6.	4 стр.	Сахиев Б.Ж., Монтаев С.А.
10	Шыны ұнтағымен кешенді минералдық модификациялау кезінде силикат кірпіштің жылуфизикалық және беріктік қасиеттерінің өзгеру заңдылықтары	печатный	Труды Международной научно-практической конференции «Наука, инновации, техническое регулирование и инжиниринг в строительстве: цифровые и интеллектуальные технологии, состояние и перспективы» (SITREC 2026), 21–22 мая 2026 г. – Караганда: Изд-во НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», 2026. – 533 с. ISBN 978-601-355-704-5.	5 стр.	Сахиев Б.Ж., Монтаев С., Пазылова С.

Научное издание

Монтаев С.А., Сахиев Б.Ж., Жарылгапов С.М.

**Научные основы создания энергоэффективного
силикатного кирпича с использованием вторичного
стекольного, техногенного алюмосиликатного и
природного кремнеземсодержащего сырья**

МОНОГРАФИЯ

Подписано к печати 01.10.2026 г.
Формат 60х84 1/16 Бумага листовая 80 м/г
Объем 14 п.л. Заказ №411
Тираж 500 экз.

*Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных оригиналов*

НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический
университет имени Жангир хана»
090009, г.Уральск, Жангир хана, 51