

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»  
(Наименование)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии  
и биотехнологии  
(Код и наименование направления подготовки/специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов  
(направленность (профиль)/специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Предложение технологического решения по использованию стеклобоя в качестве заполнителя для бетонных блоков

Обучающийся

А.Д. Груздева  
(Инициалы Фамилия)

\_\_\_\_\_  
(личная подпись)

Руководитель

Ю.Н. Шевченко

\_\_\_\_\_  
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023



**Росдистант**  
ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННО

## Аннотация

Бакалаврскую работу выполнила: Груздева А.Д.

Научный руководитель: старший преподаватель кафедры «Химическая технология и ресурсосбережение» Шевченко Ю.Н.

Тема работы: Предложение технологического решения по использованию стеклобоя в качестве заполнителя для бетонных блоков.

В настоящее время одним из перспективных направлений является разработка энергоресурсосберегающих технологий, в которых вместо первичных применяются вторичные сырьевые материалы. Это позволяет уменьшить объемы отходов в окружающей среде и вовлечь их в ресурсный цикл, сократив при этом объемы использования первичных природных ресурсов. Стекланные отходы – одни из основных. Они представляют собой трудноутилизируемый материал, имеющий различный дисперсный состав, который практически не используется повторно.

Ресурсная база несортированного боя технических стекол представляется весьма значительной для производства строительных материалов, в том числе для производства бетонной смеси с заполнителем из стеклобоя. В качестве потенциальных потребителей стеклобоя могут выступать предприятия по выпуску строительных материалов, изделий и конструкций.

Целью работы является снижение негативного воздействия на окружающую среду путем разработки технологических решений по использованию стеклобоя в качестве добавки в качестве заполнителя для бетонных блоков.

В первой главе анализируется влияние стеклобоя на окружающую среду и его масштабы, а также анализируется анализ проблем переработки стеклобоя.

Во второй главе рассматриваются основные компоненты для бетонной смеси и описание преимуществ добавления в эту смесь стеклобоя

определенной фракции. Так же в этом разделе будет рассмотрена существующая на предприятии ООО «ЭкоТэк» технология переработки стеклобоя.

В третьей главе рассмотрено предложение технологического решения для модернизации технологии в целях получения стеклобоя нужной фракции (50 микрон) для его добавления в бетонную смесь. Рассмотрена проблема внутренней коррозии, связанной с протеканием щелочесиликатной реакции между частицами наполнителя. Проведен расчет материального баланса. Проведен расчет прочности бетона на сжатие, который показал, что исходя из ГОСТ 6133-99 полученное нами значение соответствует требованиям, в которых бетонные блоки должны иметь прочность на сжатие не меньше  $150 \text{ кгс/см}^2$ .

В четвертой главе расчет экономической и экологической эффективности, который

Заключение содержит основные выводы по проведенной работе и ее результаты. Работа изложена на 54 страницах, включает 9 рисунков и 9 таблиц.

## Содержание

Введение.....	5
1 Характеристика отходов из стекла и их влияние на окружающую среду.....	7
1.1 Влияние стеклобоя на окружающую среду.....	7
1.2 Способы утилизации стеклобоя .....	8
1.2 Анализ проблем переработки стеклобоя .....	12
2 Технологии переработки стеклобоя в бетон.....	16
2.1 Основные материалы для получения бетонов из стеклобоя.....	16
2.2 Анализ технологии переработки стеклобоя на ООО «ЭкоТэк».....	22
2.3 Предложение технологического решения для переработки стеклобоя..	25
2.4 Преимущество добавки стекла в бетон.....	27
3 Технология получения бетонных блоков с добавлением стеклобоя.....	35
3.1 Схема получения стеклоблоков.....	35
3.2 Расчет материального баланса.....	37
4 Экологическая и экономическая эффективность.....	44
4.1 Экономический эффективность.....	44
4.2 Экологический эффективность.....	45
Заключение .....	47
Список используемых источников.....	49

## Введение

Среди всего многообразия техногенных отходов, значительная часть приходится на бой стекла, а между тем он является эффективным вторичным ресурсом, который может быть использован в строительной индустрии для получения связующих, бетонов и их изделий, что будет способствовать получению как экономического, так и экологического эффектов.

«Возможность использования стеклобоя при производстве строительных материалов различного назначения доказана перечнем исследований, проводимых в разные годы во многих научно-исследовательских организациях и ведущих технических вузах Российской Федерации» [22, 29].

Наиболее распространенным способом утилизации стеклобоя является технология изготовления бетона. В статье [21] подчеркнута, что использование стеклобоя позволяет получить бетоны с характеристиками, превосходящими по прочности обычные бетоны на песчаном заполнителе. Такое увеличение прочности будет достигаться за счет поверхностной кристаллизации крупного заполнителя. Кроме того, в статье [21] говорится о возможности использования тонкодисперсного стекла, но уже в виде вяжущего или с дальнейшей переработкой в пеностекло. Экспериментально установлено [4], что мелкие и крупные фракции стекла применять нецелесообразно по причине большей вероятности протекания силикатно-щелочной реакции, однако ее можно подавить при помощи добавок или путем предварительной термообработки.

Бетон - это искусственный камень, состоящий из четырех основных компонентов: воды, цемента, мелких и крупных заполнителей. Бетон - композиционный материал, получаемый в результате формования и твердения рационально подобранной бетонной смеси.

«Увеличение объемов производства бетона и железобетона невозможно без увеличения количества заполнителей. При среднегодовом

объеме производства бетона и железобетона более 60 млн м<sup>3</sup> (в том числе более 20 млн м<sup>3</sup> сборного и более 40 млн м<sup>3</sup> товарного) и строительных растворов 20–25 млн м<sup>3</sup>, потребность в нерудном заполнителе составляет более 50 млн м<sup>3</sup> (или более 65 млн т), в мелком заполнителе 50–55 млн м<sup>3</sup> (или более 70 млн т)» [26].

Актуальностью данной выпускной квалификационной работы является утилизация отходов стеклобоя с дальнейшим его применением в качестве заполнителя для бетона.

Целью представленной работы будет уменьшение негативного воздействия на окружающую среду отходов стекла путем его вторичного использования в качестве заполнителя для бетонов, а также предложение технического решения при подготовке стеклобоя нужной фракции.

Задачи:

- провести анализ проблем образования стеклобоя;
- проанализировать действующую технологию по переработке стеклобоя;
- предложить технологическое решение по использованию стеклобоя в качестве заполнителя бетона;
- провести расчет материального баланса.
- провести расчет экономической и экологической эффективности.

# **1 Характеристика отходов из стекла и их влияние на окружающую среду**

## **1.1 Влияние стеклобоя на окружающую среду**

Ежегодное количество отходов стеклобоя достигает несколько миллионов тонн. Сложившаяся в Российской Федерации ситуация в области образования, использования, обезвреживания, хранения и захоронения отходов ведет к опасному загрязнению окружающей среды, нерациональному использованию природных ресурсов, значительному экономическому ущербу и представляет реальную угрозу здоровью человечества. Поэтому проблема обезвреживания, переработки и утилизации отходов с каждым годом становится всё более важной и актуальной. При решении проблемы отходов, с одной стороны, уменьшается их отрицательное воздействие на окружающую среду, а с другой – решаются задачи сбережения ресурсов.

В России на данный момент стекло на отвалах и хранилищах занимает 12% от всего объема отходов. С недавнего времени в России возник интерес к отходам из стекла. Повышение такого интереса связывают с тем, что стекло это материал, который не горит, не гниет, и не разлагается под воздействием атмосферных осадков в течении нескольких десятков лет.

На фоне этого и возникает проблема с выбором методов утилизации стекла. Самым действующим эффектом в утилизации стекла будет его использование в виде стеклобоя.

При утилизации 1 миллиона бутылок, можно сохранить до 350т кварцевого песка и 100т кальцинированной соды [39].

Расчеты предприятия ООО «Куприт» по Кирову показывают, что каждый житель ежемесячно выбрасывает примерно 40кг ТКО, из них 9% это стеклотара, то есть 3,6 кг стеклотары на человека в месяц.

В Кировской области действуют пункты приема вторсырья. С них собирается по 20-25 тонн в месяц стеклотары, следовательно, это 300-350 тонн в год. В среднем вес одной бутылки 300 грамм, соответственно собирается ежемесячно примерно 67000 шт стеклотары (бутылки, банки).

Стеклянные осколки могут быть использованы в качестве добавки в строительные материалы, такие как бетон и асфальт. Они улучшают прочность и износостойкость таких материалов, а также снижают их стоимость. Этот способ утилизации стекла позволяет уменьшить использование природных материалов и сократить количество отходов на свалках.

Переработка стеклянных осколков является важным этапом утилизации стекла, который позволяет уменьшить его влияние на окружающую среду. В процессе переработки стеклянных осколков они могут быть использованы в различных сферах и превращены в новые полезные продукты.

## **1.2 Способы утилизации стеклобоя**

«Возможности промышленного использования стеклобоя в качестве минерального сырья раскрыта далеко не полностью. Его вторичное использование обозначено с одной стороны уровнем существующих технологий, и с другой стороны экологической обстановкой на территориях, а также наличием предприятий, обладающих такими технологиями повторного использования стекла.

В настоящее время использование сортового стеклобоя производится на большинстве стекольных заводов, где с собственным стеклом от брака и нарушений в технологическом режиме есть возможность использования вторичного стеклобоя, собранного как вторичный ресурс.



В данном случае, существующий технологический процесс предприятия восполнит значительные объемы материала без ущерба для качества продукта с экономией энергетических и сырьевых затрат.

Огромным недостатком для большинства методов переработки стеклобоя является его непостоянный химический, фазовый состав, а так же наличие разных примесей.

Помимо этого, несортированный стеклобой имеет отличие неравномерным распределением по размерам, что и затрудняет разработку одной технологии для его переработки

Поэтому, добавляется еще одна стадия в технологию – процесс сортировки стекла. Для осуществления данной процедуры используется как ручной труд, так и современное оптическое контрольное оборудование.

Но даже с использованием современных технологий сортировки получается недостаточная однородность стекла. В связи с этим, основная проблема переработки стеклобоя и заключается именно в утилизации несортированного стекла. При изучении обзоров основных путей утилизации стеклобоя и свойств стекла в разных дисперсных состояниях и при разных температурах все способы переработки можно разделить на 4 группы» [47].

Первая группа

«Способы переработки кускового стекла с частицами размеров более 0,5 – 1 мм. Для стекла с таким фракционным составом характерна высокая прочность, хорошая адгезия к силикатным материалам, высокие декоративные свойства» [23]. «Как один из способов утилизации стеклобоя является его использование в качестве подстилающей основы для дорожного полотна, то есть как дренаж в земле, закладка, основа для дорог. В этом случае вместо широко используемого щебня берется стеклобой. Большой плюс в использовании стекла – это примерная или даже меньшая стоимость, достаточная стойкость к нагрузкам под давлением и удару, а так же хорошие дренажные свойства. Кроме подстилающей основы для дорог можно использовать стекло и для самих дорог – стекло-асфальт. Использование

кусочков стекла вместо щебня – это дополнительная видимость в ночное время и более низкая объемная плотность. Применение стекла в качестве декоративного элемента позволит нам заменить щебень и гравий при получении облицовочных конструкций. Такое использование позволит получить новые декоративные цвета с высокой прочностью и низкой ценой» [3].

#### Вторая группа

«Способы переработки дисперсного порошка с частицами от 0,05-0,1 до 0,5-1,0 мм. Для этого стекла обычно характерна высокая прочность на истирание и довольно высокая инертность» [25,48].

«Первым способом из этой группы будет использование стекла, как добавка абразивного элемента вместо кварцевого песка, абразивных частиц стальной дробы, чугуновой дробы, гранита, стеклянной дробы, оксида алюминия, медного и никелевого шлака. В сравнении с перечисленными мною материалами стекло имеет улучшенную безопасность – оно не будет содержать кристаллического кварца и будет иметь низкое содержание более тяжелых металлов, а также более низкую цену и эффективное применение» [6].

#### Третья группа

«Эти методы основаны на использовании средне- и мелкодисперсного порошка, в котором частицы менее 0,1 мм» [46]. «В измельчении стекла до таких размеров (50мкм) большую роль будут играть поверхностные силы и такой порошок будет обладать вяжущими свойствами» [15,18]. «Применение такого стекла, как заполнитель в бетоне, краске и пластмассе могут заменять глину и карбонаты, а получение продукта будет того же качества. Использование стекла в виде добавки в клинкер как до, так и после обжига аналогично замене стекла в бетоне, с разницей, что после в данном случае применяется не кусковое стекло, а его порошок. Превращение мелко дисперсного порошка на основе боя стекла в камневидное тело происходит в связи взаимодействий компонентов, входящих в его состав, с водным

раствором щелочей. В дальнейшем получают строительные изделия с плотностью 600-2500 кг/м<sup>3</sup> при прочности 0,5-25 Мпа с коэффициентом теплопроводности от 0,13 Вт/(мС)» [49]. Еще одним из способов является применение стекла как добавка в цемент. В данном случае можно добиться практически полной замены цемента при получении монолитных бетонных композиций.

#### Четвертая группа

«В этой группе используются пиропластичные свойства стекла при температурах от 680-850°С. В этом самое главное отличие от всех вышеперечисленных групп. В керамике и кирпиче в качестве связующего компонента возможно заменить глину на порошок стекла. Эта замена поможет увеличить прочность, устойчивость к морозам, размягчения, уменьшит время обжига и потребление топлива. Стекловата и волокно из стекла является одним из самых крупных потребителей стеклобоя, как пиропластичного материала» [5,44]. Основной потребитель боя стекла – это стекловаренные заводы. Однако, они более ориентированы на сортированный стеклобой. Из отходов некоторых производств в смеси со стеклобоем могут быть получено стекло и керамика. Однако в этом случае нужно разработать технологию для конкретного состава отходов и стеклобоя. «Стекло при повышенной температуре, как неравновесная система – всегда стремится к кристаллизации, как переохлажденная жидкость» [43]. Исходя из этого на рассмотрении способов переработки стеклобоя при повышенных температурах следует остановиться на технологиях, которые приводят к кристаллизации стекла. Как правило цель данных технологий – это получение строительных материалов, которые достигаются на основе стекол определенных составов с дальнейшей их кристаллизацией. Данные материалы отличаются долговечностью, прочностью, абсолютно нулевым водопоглощением, огнестойкостью, довольно высокой износостойкостью, и способностью работать в агрессивных средах.

Переработка стеклянных осколков включает несколько этапов:

Сортировка осколков. Сначала осколки стекла сортируются по цвету и размеру. Это позволяет упростить дальнейший процесс переработки.

Измельчение стеклянных осколков. После сортировки осколки подвергаются измельчению. Это делается специальными стеклодробилками, которые размельчают осколки до мелкого состояния.

Очистка от примесей. Полученная после измельчения масса стекла подвергается очистке от примесей, таких как песок и металлические осколки. Это важный шаг, который позволяет получить чистый материал, готовый к дальнейшей переработке.

Плавка и формовка. Очищенная масса стекла плавится при высокой температуре и затем формуется в новые изделия. Новые изделия могут быть различной формы и предназначаться для разных целей.

Использование полученных продуктов. Из переработанных стеклянных осколков могут быть получены новые стеклянные изделия, такие как бутылки, стаканы, оконные блоки и многие другие. Они могут использоваться в различных сферах: строительстве, производстве упаковки, оформлении интерьеров и т.д. Полученные продукты имеют такие же свойства и качество, как и стекло, из которого они были получены.

Переработка стеклянных осколков является эффективным способом утилизации стекла и снижает его негативное воздействие на окружающую среду. Она также помогает сэкономить ресурсы, так как переработка стекла требует меньше энергии, чем производство нового стекла. Поэтому важно отделять стеклянные осколки от общего мусора и отправлять их на переработку.

### **1.3 Анализ проблем переработки стеклосбоя**

«С экологической точки зрения стекло считается наиболее трудно - утилизируемым отходом. Оно не подвергается разрушениям под воздействием воды, атмосферы, солнечной радиации, мороза. Помимо этого,

стекло — это коррозионностойкий материал, который не разрушается под воздействием подавляющего количества сильных и слабых органических, минеральных, а также биокислот, солей, и даже грибов и бактерий. Поэтому если органические отходы полностью разлагаются уже через 2-3 года, полимерные материалы - через 7-25 лет, то стекло, как и сталь, способно сохраняться без особых разрушений десятки и даже сотни лет. Многие ведущие научно-исследовательские центры в России, странах СНГ и за рубежом в последние годы ведут активные работы в области утилизации стеклобоя. Так, например, в США, на исследования, проводимые специалистами инженерного факультета и прикладных наук Колумбийского университета (штат Нью-Йорк), связанные с проблемой замены каменного заполнителя в бетоне боем стекла, было выделено 444 млн долл» [6].

Утилизация стеклянной тары может производиться по трем направлениям: использование в качестве вторичного сырья при производстве стеклянной тары, использование в качестве одного из компонентов-наполнителей в различных производствах, твердые бытовые отходы.

(Рисунок 1). Основным направлением применения стеклобоя во всем мире является производство тары.



Рисунок 1 – Направления утилизации стеклотары

Общеизвестными продуктами переработки стеклобоя являются различные строительные изделия: стеклоблоки, стекловата, пеностекло, изготовление асфальтобетона с добавлением стекла.

Новые научные открытия и технологии за последние годы существенно расширили физико-химические свойства стеклоблоков [42,45]. К основным достоинствам стеклоблоков относятся: высокая звуко- и термозащита; повышенная химическая стойкость поверхности; абсолютная влагонепроницаемость; высокая пожаро-устойчивость; лёгкость ухода за поверхностью; прочность конструкции из стеклоблоков; простота монтажа; высокая светопроводимость; многообразие цветов, оттенков, текстур и форм.

Стекловата – волокнистый теплоизоляционный материал в виде ваты, отвечает требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам: низкая теплопроводность, устойчивость к нагрузкам, паропроницаемость, водоотталкивающие свойства.

Пеностекло - это уникальный теплоизоляционный материал, применяется для тепло- и звукоизоляции, выпускается в виде жестких блоков и крошки или окатышей. Преимущества пеностекла: негорючесть; водонепроницаемость; надежность и долговечность; химическая стойкость; экологичность; устойчивость к грызунам. Сочетание высоких теплоизоляционных свойств при пожарной безопасности, долговечности и экологической чистоте ставит пеностекло практически вне конкуренции с другими материалами.

В России распространённым способом утилизации стеклобоя является производство мелкозернистого бетона. Этот материал отличается огнеупорными свойствами, что позволяет применять его при строительстве жилых домов и энергетических объектов.

«Увеличение объемов производства бетона и железобетона невозможно без увеличения количества заполнителей. При среднегодовом объеме производства бетона и железобетона более 70 млн м<sup>3</sup> (в том числе более 30 млн м<sup>3</sup> сборного и более 50 млн м<sup>3</sup> товарного) и строительных

растворов 22-27 млн м<sup>3</sup>, потребность в нерудном заполнителе составляет более 70 млн м<sup>3</sup> (или более 75 млн т), в мелком заполнителе 60-55 млн м<sup>3</sup> (или более 68 млн т)» [2,5,7,16].

Бытовой и промышленный стеклобой, не находящийся на сегодняшний день сбыта, но обладающий высокими прочностными характеристиками и доступностью, к сожалению, практически не используется как заполнитель бетонов.

Выводы по разделу:

Актуальной задачей строительной индустрии, в настоящее время, является производство эффективных материалов строительного назначения, характеризующихся высокими физико-механическими свойствами, долговечностью, эксплуатационными и эстетическими показателями, низкой стоимостью. Переработка стеклянных осколков является эффективным способом утилизации стекла и снижает его негативное воздействие на окружающую среду. Наиболее распространенным способом утилизации стеклобоя является технология изготовления бетона [10–12]. «В основе работ, направленных на использование стеклобоя, лежит теоретическое положение о том, что стекла в тонкодисперсном состоянии при повышенных температурах в щелочной среде обладают вяжущими свойствами и способны в результате омоноличивания твердой фазы образовывать прочный строительный материал. После сортировки, дробления, помола и рассеивания на фракции стекло можно считать полностью подготовленным для получения строительных материалов. При введении стеклобоя в бетон, как заполнителя, вызывает взаимодействие аморфного кремнезема, входящего в состав стекла, с щелочами цемента» [12]. Вопрос разработки составов и технологий получения строительных материалов на основе отходов промышленности весьма актуален. Уже нашли применение вяжущие бетоны и изделия с использованием различных шлаков, шламов, и т.д. Актуальность разработки составов и материалов с их использованием диктуется не только экологическими, но и экономическими факторами.

## 2 Технология переработки стеклобоя в бетон

### 2.1 Основные материалы для получения бетонов из стеклобоя

В настоящее время ведутся в области создания строительных растворов, мелкозернистых бетонов и поризованных теплоизоляционных материалов на основе стеклобоя, подборов их составов и технологий изготовления. Существует аналог гранулированного пеностекла – наполнитель искусственный пористый, применяемый при приготовлении легких и силикатных бетонов. «В ближайшем зарубежье на базе Карагандинского государственного технического университета имени Абылкаса Сагинова проводятся эксперименты с целью изучения замещения части цемента в составе тяжелого бетона мелкодисперсным стеклом» [2].

«При рассмотрении стеклобоя, как сырья для получения вяжущего вещества, большее значение будет иметь содержание в его составе кремнезема и щелочных оксидов, и содержание  $Al_2O_3$  и  $CaO$ . При повышенных температурах в щелочной среде стекло обладает вяжущими свойствами со способностью в результате омоноличивания твердой фазы образует довольно прочный строительный материал. Однако, важно и открытие механизма и кинетики взаимодействия воды с кремнеземом в системе присутствия щелочных оксидов. Для предания вяжущих свойств высокодисперсному порошку кремнезема будет изменение предельной концентрации продукта растворения-кремниевой кислоты в виде  $Si(OH)_4$  и создание условий для гелеобразования. Основным фактором, изменяющим предельную растворимость  $SiO_2$  в воде нужно считать фазовое состояние исходного кремнезема, рН среды, температуру и давление среды, наличие или отсутствие примесей в кремнеземе, их ид и количество, степень дисперсности растворяемых частиц кремнезема» [41]. Применение определенных технологических процессов и добавок, ускоряет осаждение



SiO<sub>2</sub>, уплотнение геля и его кристаллизацию. То есть переход кремнезема из полимера в плотный и довольно прочный водо-нерастворимый камень.

После сортировки, дробления, помола, а также рассеивания на фракции стекло можно считать полностью готовым для получения строительных материалов. Самый простой и более доступный вариант утилизации стеклобоя – это традиционная технология изготовления бетона, где стеклобой будет являться добавкой в качестве заполнителя бетона. В получении бетона возможно использование озвученных сырьевых материалов: портландцемент, дробленый стеклобой различных фракций, вода водопроводная, песок, щебень. «В данной системе доля использования стеклобоя может достигать до 70%. Еще одна технология мелкозернистого бетона и раствора позволяет максимально утилизировать стеклобой. Его доля в общем составе может достигать от 95 до 98%. Нужно использовать следующие материалы: тонкомолотый стеклобой с удельной поверхностью 260-360 м<sup>2</sup>/кг, дробленый стеклобой, абсолютно различных фракций, инициатор твердения, затворитель [3,8,37]. В этой технологии тонкомолотый стеклобой будет использоваться как вяжущее вещество. Затворителем будут являться растворы гидросиликатных щелочных металлов в количестве 4-6% по массе и с плотностью 1,3-1,35 г/см<sup>3</sup>. Технология получения основана на перемешивании компонентов, формовании, а также и выдержке при температуре 40-50 °С» [24].

Таблица 1 – Химический состав цемента и стекла

Химический состав	Стекло	Цемент марки М400
SiO <sub>2</sub>	73,5 %	20,2 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4 %	4,7 %
CaO	9,2 %	61,9 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 %	3,0 %
MgO	3,3 %	2,6 %
Na <sub>2</sub> O	13,2 %	0,2 %
K <sub>2</sub> O	0,1 %	0,8 %
SO <sub>3</sub>	0,5 %	3,9 %

Основным компонентом в составе цемента, который делает его пригодным для использования в качестве вяжущего наполнителя в составе бетона, будет являться оксид кальция.

Как видно в таблице 1 в стекле присутствует около 7 % оксида кальция. По некоторым литературным данным материалы, обладающие менее 15 % оксида кальция, вяжущими качествами не владеют. Однако известно, что вяжущие свойства оксида кальция будут обнаруживаться при измельчении стекла.

«Бетон – композиционный материал, получаемый в результате формования и твердения рационально подобранной бетонной смеси. Все бетоны имеют капиллярно-пористую структуру, состоящую из трех основных компонентов: заполнителя; связующего вещества; пустот в виде пор и капилляров, заполненных воздухом, водой и водяным паром» [30].

Бетон – это смесь из нескольких веществ – цемента (связующего), воды, песка и наполнителя. В качестве наполнителя используют щебень, шлак. Можно использовать и отсев (каменную крошку). В нашей технологии будет использоваться цемент М500 (с добавлением стеклобоя), щебень менее 10мм, песок, вода. Основным документом, регламентирующим качество цементов в строительстве, является ГОСТ на общестроительные цементы за номером Р 57293\*2016, им мы и будем руководствоваться при выборе состава нашего стеклобетона. Характеристика материалов, которые будут использоваться для получения стеклобетона будет приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика материалов [9-13]

Материал	Стандарт	Примечание
Портландцемент	Портландцемент М500-ГОСТ 10178-85	Он разрешен в применение, как строительный материал первого класса. Пригоден в применении к бетонным и железобетонным сборным и монолитным конструкциям, требующих повышенной прочности Химический состав: CaO—60—67%; SiO <sub>2</sub> —17—25%; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —3—8% ; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —0,5—6%; MgO-0,1-4%; щелочей —0,4—1,3%; SO <sub>3</sub> —1—3%.
Стеклобой	Технические условия БТ ТУ 21-РСФСР-137-89	Тарный стеклобой. Допускается присутствие стекол из других групп не более 2%. Куски стеклобоя не должны превышать размер 100мм. Стеклобой с размерами более 100мм.не должен превышать 5% от общего объема Допускается примесь песка и глины не более 2%.
Песок	ГОСТ 22551-77	Песок для стекольной промышленности: 1 Песок среднезерновой, объемный вес - 1.75 т/м <sup>3</sup> 2 Минералы тяжелой фракции от 0,14-0,51%; 3 Усредненный химический состав Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 0,1%; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 0,4%; SiO <sub>2</sub> - 98,5%;
Щебень менее 10 мм	ГОСТ 8267-93	Параметры регламентируются по ГОСТ 8267-93: 1 Высокая адгезия к цементным и битумным вяжущим. 2 Зерна кубовидные, что позволяет обеспечивать максимальную плотность бетонного раствора в процессе интенсивного уплотнения. 3 Размер щебня 3-10 мм относится к 4 Группе, что говорит о малом количестве пластинчатых и остроугольных камешков.

Буква "М" - это максимально допустимая степень нагрузки, которую может выдержать цемент, а цифры после буквы обозначают прочность цемента. Например,

- М500-т, выдерживает давление в 500-т кг на кубический сантиметр.

- М300-а, 300-а кг соответственно на тот же кубический сантиметр.

Цемент М500-т используется в тех случаях, когда к нему предъявляются особенные требования - это фундаменты, плиты перекрытия и так далее.

Цемент М 400 - изготавливают различные ж/б конструкции, его же используют в штукатурных растворах и т.д.

Важное значение для прочности бетона играет оптимальный расход воды, который при прочих условиях соответствует максимальной прочности бетона. Компоненты бетонной смеси стараются дозировать с особой точностью: вяжущие и тонкомолотые добавки +/- 1% по массе; пористые заполнители +/- 3% по объему; и вода +/-1% по объему.

Согласно технологическим требованиям твердение бетона занимает время продолжительностью 28 суток. После пройденного времени определяют бетон на его прочность на сжатие [1,6].

«Набором прочности бетона называют процесс застывания материала до 100 процентов твердости. Согласно нормативам, ГОСТ 26633-2012, время набора полной прочности должно составлять 28 суток. Если температурные условия соответствуют нормативам, на 7 сутки твердость бетона достигает 70 процентов» [10].

«Застывание раствора — процесс, который отложен во времени. Даже по достижении 100% набора через 28 дней, прочность бетонной конструкции продолжает изменяться. В благоприятных условиях бетон продолжает набирать прочность в течение года и может улучшить свои свойства в 1,5-2 раза» [6,24].

По своей структуре бетон будет являться сложным композиционным материалом, который получают из воды, минеральных веществ, различных добавок и цементного вяжущего вещества.

Процесс твердения бетона.

Застывание раствора

Комплексная химическая реакция, в которой во время контакта минералов с водой запускается процесс гидратации. В результате присоединения молекул воды к клинкерным частицам образуется твердое монолитное вещество. Специалисты по изучению строительных материалов разделяют процесс достижения залитым раствором полной готовности к эксплуатации на два этапа — схватывание и твердение.

Схватывание

«На этой стадии происходит трансформация раствора из полужидкого в твердое состояние. Для поддержания материала в нужной степени пластичности с момента смешивания цемента с водой до окончания заливки в подготовленные формы, бетон непрерывно перемешивают. Для этого используют специальные агрегаты — бетономешалки. После заливки раствор утрамбовывают внутри опалубки и прекращают механическое воздействие на него. Без перемешивания клинкерная смесь активно вступает в реакцию с водой и теряет свою подвижность» [24].

«Стандартные смеси схватываются за 24 часа» [30]. Потеря подвижности материала — главное отличие схватывания. После полной потери пластичности раствора на месте застывания начинается процесс твердения.

Твердение

«Затвердевание бетона — главный и самый ответственный этап. Во время реакции твердения происходит окончательное превращение сухого раствора, соединенного с водой, в монолитный материал, который похож по прочности на камень» [8].

Готовая к использованию бетонная смесь, состоит из 4 основных компонентов:

1. цемента – 2 части или 26%;
2. щебня – 4 части или 54%;
3. песка - 1 часть или 13%;
4. воды – ½ части или 7%.

Для производства одного блока требуется 1,8 кг песка; 2,7кг цемента; 1,5 кг воды и 9кг щебня [5].

Итоговым продуктом производства бетона с применением стеклобоя будут полнотелые блоки размером 390x190x188 мм. (рисунок 2).

Согласно ГОСТ 6133-99 камни бетонные должны иметь предел прочности при сжатии не меньше 150кгс/см<sup>2</sup>. Этот параметр мы и возьмем за основу при сравнении конечного продукта с образцом.

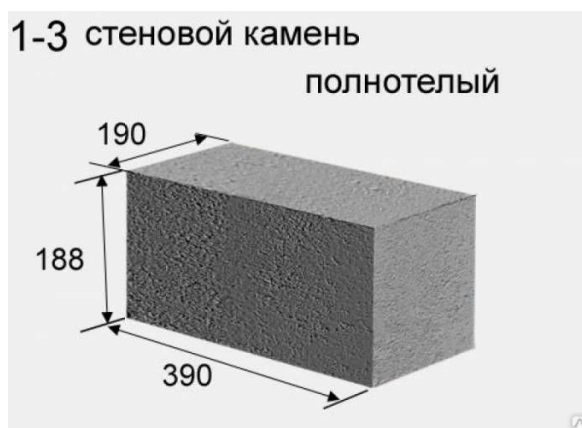


Рисунок 2 - Конечный продукт

## 2.2 Анализ технологии переработки стеклобоя на ООО «ЭкоТэк»

Рассмотрим существующую технологическую схему обработки стеклобоя, на примере предприятия ООО Экотек (г. Киров). Перед отправлением стеклобоя на дробление оно проходит две станции – мойка и сушка.

В начале стекло проходит через автоматическую машину для мойки стеклотары DXP95/6.



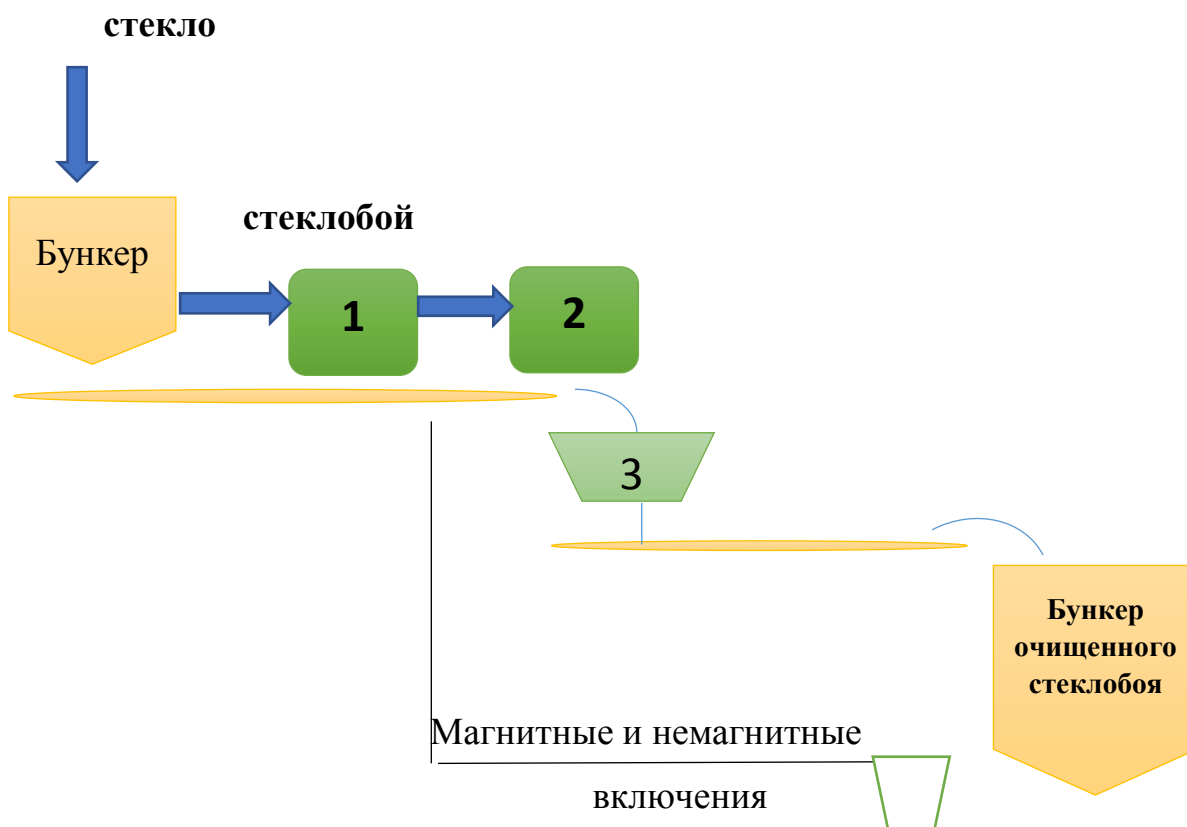
Рисунок 3 - Моечная машина стеклотары

Моечная машина DXP95/6 – это автоматическая программируемая машина непрерывно-поточного действия, которая предназначена для подготовки. Цикл обработки: замачивание – отделение старых этикеток – мойка с применением моющих средств – первичное ополаскивание – окончательное ополаскивание.

Система удаления этикеток двухступенчатая. На первом этапе, после примерно 40% от общего времени замачивания, вспомогательные распылители удаляют уже частично отделившиеся этикетки, и поток с плавающими этикетками направляется непосредственно на выходной фильтрующий конвейер, проходящий через машину. На втором этапе, в конце времени замачивания, струи воды ударяются о бутылки со всех сторон и полностью удаляют этикетки. Время нахождения одной партии в машине (максимальная загрузка 840 шт.) 23минуты. Следовательно, ее производительность это 2000 бутылок/час.

Затем стеклотару помещают в сушильный аппарат, где она продувается горячим воздухом.

Цвета и формы, стекла, по химсоставу, классифицируются по гидролитическому классу (от гидролитического класса I до класса V), чем выше класс, тем ниже гидролитическая стойкость, т.е. выше прочность зоны контакта с твердеющим портландцементным камнем, но прочность будет более чем достаточная на стеклах любого состава, поскольку прочность стекол, в зависимости от состава, 40-200 МПа, а бетона 8-50 Мпа (ГОСТ 10178-85).



1-ленточный конвейер (+стадия ручной сортировки); 2 – магнитный сепаратор СМНР; 3 – молотковая дробилка ДМ – 40.

Рисунок 4 – Технологическая схема обработки стеклобоя

Несортированный стеклобой загружается в приемный бункер, далее он подается на ленточный конвейер, на котором осуществляется магнитная сепарация, а также имеет место быть стадия ручной сортировки. На данном этапе из стеклобоя удаляются все инородные включения, например, камни,



металл, дерево, которые так же могли попасть в процессе погрузки стеклобоя вна загрузке в приемный бункер.

После стеклобой подается на дробление в дробилку молотковую ДМ-40, где происходит дробление стеклобоя на фракции не более 50мм, данная фракция является недостаточной для использования в качестве связующего наполнителя.

### **2.3 Предложение технологического решения для получения стеклобоя**

Для получения стеклопеска нужной фракции модернизируем схему обработки стеклобоя. Для более мелкого дробления стеклобоя добавим роторно-дисковый измельчитель 2/350. Согласно работа [21-24,28,29,35] сортировка стекла не требуется, так как не оказывает достоверно значимого эффекта.

Роторно-дисковый измельчитель РДИ 2/350 (Рисунок 5). Исходный материал загружается в бункер измельчителя и под собственным весом перемещается в зону вращения дисковых роторов. Куски материала, попадая в камеру измельчения, захватываются и измельчаются дисками роторов за счет удара и истирания. Измельченный материал просыпается в зазоры между дисками и отверстиями решетки в разгрузочное устройство. Диски роторов самоочищаются от материала в центральной зоне камеры измельчения и зонах установки отражателей. Входящая фракция от 40-50мм, выходящая фракция от 4-5 мм.



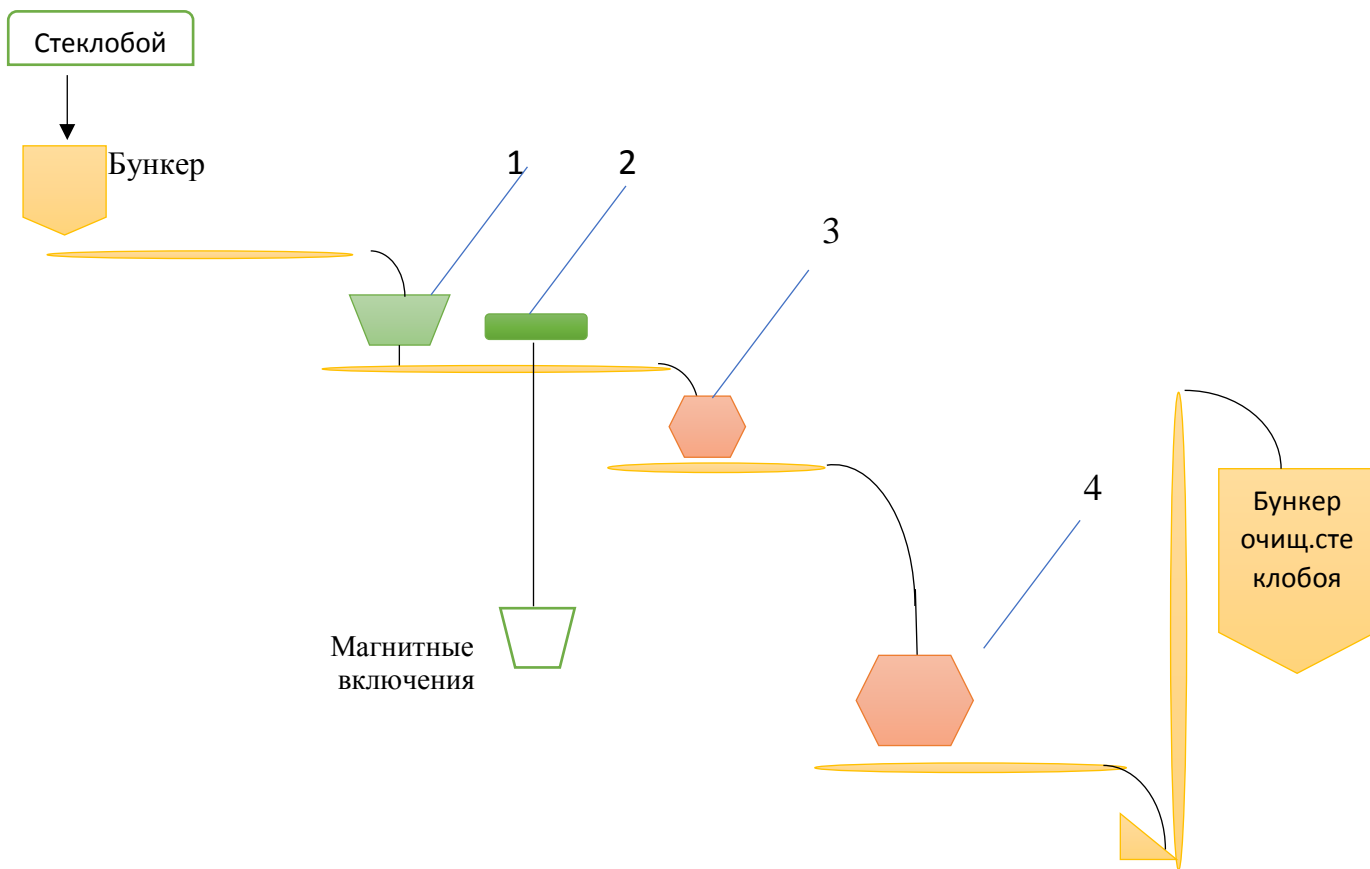
Рисунок 5 - Роторно дисковый измельчитель РДИ 2/350

Для подготовки нужной фракции стекла, перед приготовлением бетонной смеси нужно поместить получившийся порошок с размером частиц 4-5мм в вибрационный истиратель 75Т-ДРМ для того чтобы в стекле появились пуццолановые свойства. В данном истирателе наш стеклобой измельчится до 50микрон и будет готов к добавлению в бетонную смесь. Тонкость помола стеклянного порошка прагматично согласовывается в тонкости помола цемента (фракция цемента 30-50 мкм по ГОСТ 31108), а зерна стекла не имеют игольчатой формы. За 5-6 минут он будет истирать 200гр стеклобоя, следовательно, в среднем за сутки мы получим примерно 90кг измельченного стеклобоя до 50 микрон.



Рисунок 6 – Вибрационный истиратель для подготовки стекла фракции 50мкм

Модернизированная технологическая схема по подготовке стеклобоя нужной фракции (50мкм).



1 – молотковая дробилка ДМ-40; 2 – магнитный сепаратор ПСМ 600/300; 3 – роторно дисковый измельчитель РДИ 2/350; 4 –вибрационный истиратель 75Т-ДРМ

Рисунок 7 - Модернизированная технологическая схема

#### 2.4 Преимущество добавки стеклобоя в бетон

Технология производства пористых заполнителей имеет свои особенности для каждого вида, но, в общем, суть ее заключается в расплавлении исходного минерального сырья, вспучивании расплава и быстром охлаждении в течение 30 - 60 мин. Структура стеклогранулятов представляет собой систему, состоящую из ячеек преимущественно округлой формы. Поры разделены тонкими перегородками, состоящими из более

легких замкнутых пор. Большое содержание стеклофазы и равномерное распределение мелких пор правильной формы обеспечивает стеклогранулятам повышенную прочность и пониженную теплопроводность [2].

«Тем не менее, проблема взаимодействия натрий-кальциевого силикатного стекла с цементным камнем создает серьезные проблемы при использовании стеклобоя как эффективного наполнителя в цементных композиционных материалах. В результате щелочно-силикатной реакции образуется гель, который разбухает в присутствии влаги, приводя к образованию трещин и разрушению бетона. Данная реакция может протекать и в обычном бетоне, если наполнитель природного происхождения содержит реакционноспособный (обычно аморфный) оксид кремния. С одной стороны, стекольный наполнитель способствует протеканию в бетоне щелочно-силикатной реакции вследствие того, что стекло содержит на поверхности  $\text{Na}^+$ , способный создавать определенную концентрацию  $\text{NaOH}$  в цементной композиции даже в случае отсутствия щелочи в исходном цементе, а с другой стороны именно стекло содержит на поверхности соединения оксида кремния в аморфном виде. Известны исследования натрий-кальциевого стекла как наполнителя цементного теста. Так исследования проводились в Колумбийском университете (США) профессором С. Мейером» [5, 6]. «Выявлено, что добавление стекла в композицию в большинстве случаев приводит к протеканию процесса щелочно-силикатного взаимодействия и снижению прочности. Также проведены исследования влияния на процесс температуры и состава стекла» [7]. «Было обнаружено, что порошки стекла высокой дисперсности приводят к отсутствию расширения образцов» [8]. «Авторы делают предположение о высокой скорости протекания процесса щелочно-силикатной реакции в этом случае, что приводит к завершению процесса 24–28 ч, вследствие чего в дальнейшем не может быть зафиксировано расширение и разрушение образцов. Можно предположить, что в качестве возможных путей подавления процесса щелочно-силикатного

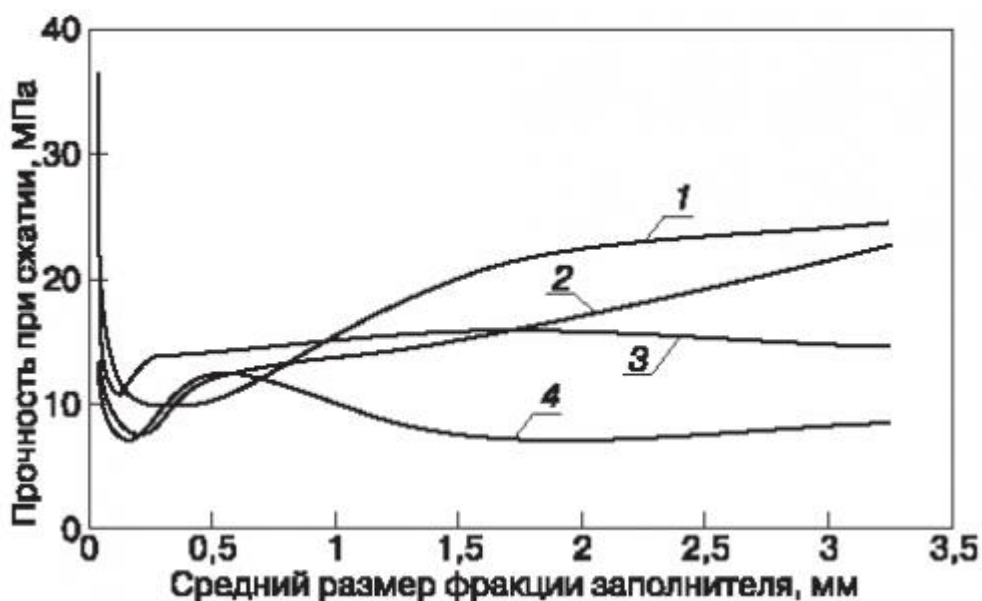
взаимодействия в композициях стекло – цемент авторы предлагают использование стекла определенного гранулометрического состава» [14, 17], добавление высокодисперсного стекла и модификацию композиции добавлением соединений лития или циркония [20].

В данной работе были рассмотрены различные варианты подавления щелочно-силикатного взаимодействия при использовании в качестве наполнителей бетона стеклобоя и продукта его переработки – пеностекла.

«Эксперименты проводились в соответствии со стандартом ASTM C 1293–01 при повышенной температуре. Для этого стандартные образцы бетонов длиной 250 мм выдерживали при температуре 60°C в течение трех месяцев. Образцы периодически извлекали из термостата для контроля расширения. После охлаждения образца до комнатной температуры его длину измеряли с помощью оптического дилатометра. Контроль прочности образцов производили на машине для испытания на сжатие ИП 6010-100-1. Для изготовления образцов использовали стандартный цемент М400 производства Пашийского цементного завода. Стеклобой получали дроблением в молотковой дробилке с последующим помолом в виброцентробежной мельнице ВЦМ\_5000. Использовано гранулированное пеностекло производства ЗАО «Пеноситал» (Пермь)» [27].

«Для оценки интенсивности и глубины протекания щелочно-силикатной реакции проведен ряд экспериментов по взаимодействию цементного материала со стеклом различных фракций как при отсутствии в цементе дополнительной свободной щелочи, так и при ее наличии. Основным параметром, характеризующим протекание реакции, является расширение образцов бетонных композитов. Косвенным подтверждением и следствием данной реакции было снижение прочностных характеристик полученных бетонов. В качестве реперных образцов, в которых реакция не должна протекать, взяты бетоны с кристаллическим наполнителем – кварцевым песком» [18].

«Выявлено, что существенное расширение образцов, характерное для щелочно-силикатного взаимодействия, наблюдается только у бетонов с крупными максимальными из исследованных фракциями, более 1,25 мм, причем эффект усиливается при дополнительном введении щелочи в состав бетонов. Зависимость прочности при сжатии от времени выдержки бетонов позволили выявить аномально высокое значение прочности для образцов бесщелочных бетонов при использовании наполнителей как минимальной, так и максимальной исследованной фракции. Причем прочность получаемых бетонов значительно превосходит прочность бетонов без стеклянного заполнителя. Это особенность позволяет предположить существенное влияние размера фракции наполнителя на прочность получаемых бетонов» [27-28]. Соответствующие зависимости прочности бетонов от фракции наполнителя в начальный и конечный период образования цементного камня представлены на рисунке 8.



1 – в возрасте 13 недель без щелочи; 2 – в возрасте 1 неделя без щелочи; 3 – в возрасте 13 недель

Рисунок 8 – Зависимость прочности бетонных композиций от размера стеклянного заполнителя в различный период времени при наличии и отсутствии дополнительной щелочи в композиции [19]

«На всех кривых прослеживается явно выраженный минимум, соответствующий наполнителю фракции 0,1–0,3 мм. Характер зависимостей прочности от дисперсности наполнителя остается неизменным – с крутым ростом в области снижения размера наполнителя и плавным ростом в области повышения размера частиц наполнителя при использовании бесщелочных композиций и незначительному росту, и стабилизации прочности в области повышения размера частиц наполнителя при использовании щелочных композиций. Со временем характер кривых не изменяется, но они смещаются вверх – к более высоким прочностным характеристикам по мере твердения цементного камня» [32-36].

«Поэтому использование стеклобоя крупных фракций – предпочтительно 1,2 мм и выше возможно в качестве наполнителя в бетонах, причем прочность этих композитов превосходит прочность обычных бетонов на песчаном наполнителе. Однако при использовании таких наполнителей существует как минимум две проблемы, связанные с возможностью протекания щелочно-силикатного взаимодействия. Во-первых, наличие в цементе или других компонентах бетона свободной щелочи неизбежно приводит к возникновению щелочно-силикатного взаимодействия и снижению прочностных характеристик бетонов. Во-вторых, в процессе крупно тоннажного производства сложно предотвратить самопроизвольное дробление и истирание крупной фракции, что также неизбежно приведет к снижению качества получаемого бетона. При размере частиц наполнителя менее 50 мкм происходит аномальный рост прочности, значительно превышающий прочность композиций на стандартном наполнителе из кварцевого песка. Такое увеличение прочности может быть объяснено способностью дисперсного стекла к вступлению в процессы образования новых фаз при образовании цементного камня за счет высокой удельной поверхности порошков стекла. Указанная особенность высокодисперсного стекла может быть использована как для подавления процесса щелочно-силикатного взаимодействия в тех бетонных композициях, когда реакция

имеет место, так и для создания вяжущих материалов на основе дисперсного стекла» [32-36].

Таблица 3 – Состав стеклогранулята

Стекло (бутылки, банки)	Массовое содержание, %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
	71,9	1,8	4,1	6,7	14,3	0,1	0,5

«Стекло, молотое до определенных фракций, реагирует с цементными гидратами, из-за которых химический состав цемента улучшается, он становится более прочным и долговечным» [30].

Благодаря достаточному измельчению стеклобоя увеличивается его удельная поверхность из-за чего и возрастает его растворимость и количество точек соприкосновения между стеклобоем и заполнителем. С этим связан рост прочности бетона. При добавке стеклобоя в бетонную смесь в размере частиц 50мкм прочность значительно увеличивается и превышает прочность композиции на стандартном заполнителе, предусмотренном ГОСТом.

«В статье рассмотрена проблема внутренней коррозии, связанной с протеканием щелочесиликатной реакции между частицами наполнителя. Авторы статьи предлагают такие решения проблемы: 1) использование низкощелочных цементных вяжущих; 2) применение заполнителей, не содержащих реакционноспособный диоксид кремния. Кроме того, предлагается применять минимальное количество цемента или изготавливать бетон на цементах, содержащих небольшое количество щелочей, использовать добавки к цементу, которые позволяют уменьшить количество щелочей в цементе или вводить гидрофобизирующие и газовыделяющие добавки. Применение типового ряда модификаторов бетона может существенно затормозить проявление щелочной коррозии. К такому выводу пришли авторы статьи. Они предлагают использовать в качестве подавителя



деформаций расширения при щелочной коррозии «Лигнопан Б-4», УПД-1, МЛ-2 и (особенно эффективно) суперпластификатор С-3» [36].

В статье [35] авторы использовали активную минеральную добавку, имеющую кислый характер, что привело к уменьшению основности вяжущего и понижению активности щелочи за счет химического поглощения последней активными компонентами смешанного вяжущего. «Гидравлически активными компонентами смешанного вяжущего являются аморфный кремнезем цеолитсодержащей породы и стеклофаза золы ТЭЦ. Альтернативой добавкам выступили методы, описанные в статьях» [17, 21]. Авторы пришли к выводу о том, что необходима кристаллизация стекла на поверхности заполнителя, которая приведет к подавлению силикатно-щелочной реакции. Для этого требуется провести термообработку стекла в печи, после чего на поверхности стекла образуется кристаллическая «пленка», которая в дальнейшем и предотвратит начало коррозии. Авторы статьи [21] также рассмотрели полное подавление щелочно-силикатной реакции путем добавления высокодисперсного оксида кремнезема (0,5–5 %) и использовали ионно-модифицированное стекло с заменой  $\text{Na}^+$  на  $\text{H}^+$ .

Для эффективного применения стекольного заполнителя необходимо определиться с фракционным составом. В статье [17] были рассмотрены различные фракционные составы стеклобоя в бетоне и проанализировано их влияние на итоговую прочность. «В результате этого выяснилось, что предпочтительная фракция – 1,2 мм и выше. Самый минимум прочности достигается на фракции 0,1–0,3 мм. Существенное расширение образцов (вследствие силикатно-щелочной реакции) достигается на заполнителе 1,25 мм. При размере частиц меньше 50 мкм происходит аномальный рост прочности, что обусловлено высокой удельной поверхностью. Чтобы использовать крупные фракции от 5 до 20 мм, необходимы две добавки: суперпластификатор и замедлитель схватывания. Это позволит снизить воздействие щелочесиликатной реакции на бетон» [25].

Для нашего бетона выбираем останавливаемся на размере фракции дробленного стекла 50 мкм.

**Выводы по главе:** были рассмотрены различные фракционные составы стеклобоя в бетоне и проанализировано их влияние на итоговую прочность. В результате этого выяснилось, что предпочтительная фракция – 1,2 мм и выше. Самый минимум прочности достигается на фракции 0,1–0,3 мм. Существенное расширение образцов (вследствие силикатно-щелочной реакции) достигается на заполнителе 1,25 мм. При размере частиц меньше 50 мкм происходит аномальный рост прочности, что обусловлено высокой удельной поверхностью. Чтобы использовать крупные фракции от 5 до 20 мм, необходимы две добавки: суперпластификатор и замедлитель схватывания. Это позволит снизить воздействие щелочесиликатной реакции на бетон

После сортировки, дробления, помола и рассеивания на фракции стекло можно считать полностью подготовленным для получения строительных материалов. Фракции стеклобоя более 5 мм используются в бетонах в качестве крупного заполнителя, мелкие фракции (менее 5 мм) — в качестве мелкого заполнителя (песка), а тонкомолотый порошок — как связующее.

В работах [31-36], что использование фракций стекла в диапазоне 50 мкм возможно без использования дополнительных добавок. Использование же тонкомолотых фракций или наоборот крупных требует для подавления силикатно-щелочной реакции использование добавок (суперпластификатор и замедлитель схватывания) или проведение предварительной термообработки.

В своей работы мы остановились на фракции 50 мкм, как наиболее выгодный вариант для реализации технологии с минимально возможными затратами.

### 3 Технология получения бетонных блоков с добавлением стеклобоя

#### 3.1 Схема получения стеклоблоков

На рисунке 9 представлена блок-схема получения стеклоблоков, представленная на рисунке составлена с учетом ГОСТ.

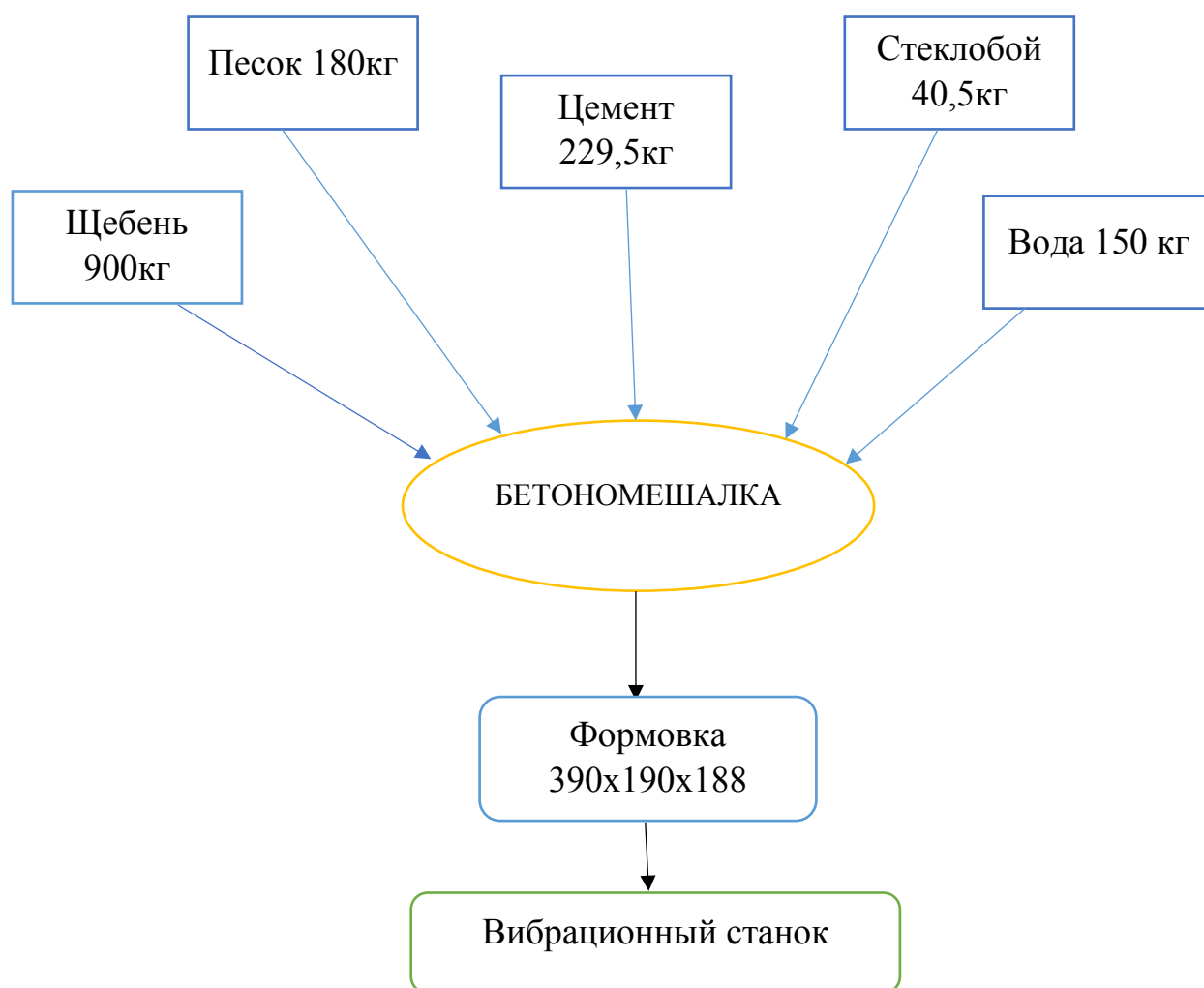


Рисунок 9 – Блок-схема получения стеклоблоков

При смешивании нашего состава будет использоваться бетономеситель роторный СБ-247.

Таблица 4 – Характеристика бетономешалки СБ-247

Объем по загрузке	До 2250кг
Частота вращений ротора	22,7 об/мин.
Крупность заполнителя	Не более 70мм.
Время перемешивания	Не более 65сек.

Авторы статьи [39] получили данные, в которых описывается применение различного вида стеклобоя в бетоне в зависимости от назначения конструкции. Таким образом, для изделий автоклавного твердения добавка стеклобоя в объеме 1,2 % позволяет получить материал с плотностью 1 230 кг/м<sup>3</sup>. Молотое стекло в составе 2–30 % с различными добавками позволяет изготовить кислотостойкие ячеистые бетоны. Тонкомолотый стеклобой в количестве 2–5 % используется для получения жаростойкого бетона.

По результатам работы выявлено, что применение стеклобоя в количестве 30 % от общего заполнителя является наиболее эффективным, а минимальное эффективное количество составило около 10 %.

Основная масса состава бетонного раствора рассчитана для получения 100 блоков с добавлением стеклобоя.

Для производства одного блока требуется 1,8 кг песка, 2,7кг цемента, 1,5 кг воды и 9 кг щебня [31]. Мы будем рассчитывать состав на производство 100 блоков. В среднем за сутки удастся изготовить до 230 блоков, исходя из количества, полученного стеклобоя нужной фракции в вибрационном истирателе. При расчете состава заменим 15% цемента на стеклобой.

Итого для изготовления 100 полнотелых блоков нам понадобится 180кг песка, 229,5кг цемента, 40,5кг стеклобоя, 900 кг щебня, 150кг воды.

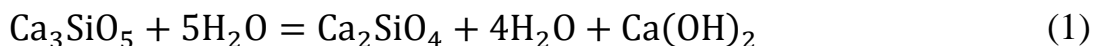
На выходе мы получим 100 полнотелых блоков размеров 390x190x188.

Стандартное время застывания бетона составляет 28 дней.

Нормальные условия для отверждения — температура +15...+22°С и влажность 60-100%.

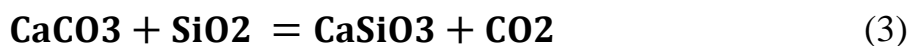
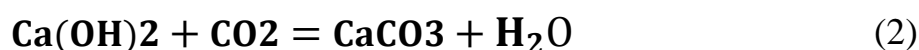
### 3.2 Расчет материального баланса

Химический процесс получения бетона представляют в виде следующей формулы:



Песок ( $\text{SiO}_2$ ) и инертные материалы не вступают в реакцию с водой [30]. Реагирует с водой только цемент, образуя пастообразную массу. В результате взаимодействия мы получаем гидросиликат и гидроалюминат. Это называется гидратацией цемента. Процесс гидратации происходит мгновенно после смешения. Так же известно, что 60% от объема воды прореагирует с кальцием, 40% воды останутся в ячейках полученного бетона. Так появляются поры в бетонной массе. По этой причине после формовки раствора его помещают в вибростанок, где выступают излишки воды и удаляются.

Одновременно с гидратацией цемента происходят другие реакции, которые и приводят к образованию цементного камня и набору необходимой прочности получаемого бетона:



В результате этих реакций получаются твердые, прочные карбонат кальция и силикат кальция. Но данные реакции протекают достаточно медленно. Максимальная прочность достигается по прошествии 28 суток.

Для получения 10 блоков мы используем 22,95 кг цемента и 4,05 кг стеклобоя, которые содержат оксид кальция, следовательно, в дальнейшем участвуют в выделении углекислого газа. Китайские ученые посчитали, что

43% углекислого газа, которые выделяются бетоном поглощаются им же, следовательно, в атмосферу уходит всего 57% [40]. Так же при экспериментах установили, что при производстве бетона на каждую тонну выделяется 190кг углекислого газа [40].

Посчитаем сколько углекислого газа удалится в атмосферу при производстве бетонов с имеющимся количеством цемента и стекла:

$$(229,5 + 40,5) \cdot 0,19 = 51,3 \text{ кг}$$

Около 60% воды удалится в атмосферу, а 40%, как было сказано, удалится еще в процессе вибрационного воздействия. Следовательно, от начального объёма воды удалится:

$$150 \cdot 0,4 + 150 \cdot 0,6 \cdot 0,5 = 60 + 45 = 105$$

Для щебня, песка потерь в процессе получения бетона не предвидится, поэтому в материальном балансе можно не отражать.

Исходя из расчета можно представить таблицу с материальным балансом процесса получения бетона с применением стекла.

Таблица 5 – Расход – приход

Состав	Приход /кг	Расход /кг
Стекло	40,5	218,7
Цемент	229,5	
Песок	180	180
Щебень	900	900
Вода	150	45
Итого:	1500	1395

Объем компонентов(кг) на производство 100 блоков за 28 суток.

После рассмотрения материального баланса получения бетона с добавлением дробленного стекла, рассчитаем материальный баланс, согласно предложенной модернизации технологической схемы (с целью получения

стеклобоя нужного качества).

На представленной схеме два добавленных аппарата в виде роторно-дискового измельчителя и вибрационного истирателя. Выходящая фракция из роторно-дискового измельчителя 4-5мм, а выход из вибрационного истирателя уже 50 микрон. В итоге тонкость помола стеклянного порошка будет идентична тонкости помола у цемента.

Исходя из данных Таблицы 3 процесс измельчения стекла происходит без протеканий каких-либо химических реакций и никаких потерь стекла не происходит.

Самая первая химическая реакция запускающая процесс гидратации происходит в момент замешивания раствора в бетономешалке. Но даже в этом процессе гидратации в материальном балансе не происходит никаких утрат содержимого, потому что в итоге этого процесса взаимодействуют смешиваемые компоненты с водой, в результате которого 60% начального объема воды вступает в реакцию с кальцием, образуя гидроксид кальция, а 40% воды остается в ячейках бетонного раствора.

Таблица 6 – Расход – приход по технологической схеме

Состав	Приход	Расход
Стекло	40,5	40,5
Цемент	229,5	229,5
Песок	180	180
Щебень	900	900
Вода	150	150
Итого:	1500	1395

Далее рассмотрим попадания бетонного раствора в формовку и вибрационный станок. Как уже было описано, в процессе вибрационного воздействия 40% воды, которые остались в ячейках бетона и не вступили в

реакцию с кальцием постепенно выступают на поверхность форм и сливаются из них. Материальный баланс представим на таблице

Расход приход после воздействия вибрационного станка на формы с раствором.

Таблица 7 – Расход – приход после воздействия вибрационного станка на формы с раствором

Состав	Приход	Расход
Стекло	40,5	270
Цемент	229,5	
Песок	180	180
Щебень	900	900
Вода	150	<b>90</b>
Итого:	1500	1395

Из этой таблицы мы видим изменения в воде. Реакция, которую образовали карбонат и силикат кальция протекают 28 дней. Когда прекращается вибрационное воздействие на наши формы с раствором, а излишняя вода уже убрана, тогда начинается протекание основных реакций (2,3), в следствии которых образуются карбонат и силикат кальция, которые и сопровождается выделение воды и углекислый газ (3). Но часть воды (уравнение 2) в течении застывания бетона успеваает выступить и испариться с поверхности. Исходя из этого материальный баланс выглядел бы таким образом.



Таблица 8 – Расход – приход под действием реакции (2)

Состав	Приход	Расход
Стекло	40,5	270
Цемент	229,5	
Песок	180	180
Щебень	900	900
Вода	90	<b>45</b>
Итого:	1500	1395

Однако, из-за того, что протекает одновременно две реакции(2,3), здесь и будут происходить потери стекла и цемента, в связи с тем, что с реакцией (3) происходит выделение углекислого газа, часть которого уходит в атмосферу, а другая его часть будет участвовать в реакции другого уравнения(2).

В итоге окончательный вариант материального баланса принимает следующий вид.

Таблица 9 – Расход – приход итоговый

Состав	Приход	Расход
Стекло	40,5	<b>218,7</b>
Цемент	229,5	
Песок	180	180
Щебень	900	900
Вода	90	<b>45</b>
Итого:	1500	1395

Блоки с добавлением стеклобоя, как ранее было написано, должны соответствовать ГОСТ 6133-99 по прочности на сжатие без добавления стеклобоя. Если эта цель будет не достигнута, то наш технологический план теряет весь свой смысл. Нужно определить будет ли наша масса в процессе эксплуатации выдерживать определенные на нее нагрузки.

Формула для расчета прочности бетона на сжатие:

$$f_b = K f_c \cdot \frac{V_{x.c.}}{V} \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от активности цемента, (0,8-1,1);

$f_c$  – активность цемента, 500кгс/см<sup>2</sup> (портландцемент 500);

$V_{x.c.}$  – химически связанная вода с цементом при гидратации (у нас это 90кг);

$V$  – общий объем воды для получения раствора 150 кг.

Так как в стекле содержится в 0,15 раз больше оксида кальция и в 3,6 раз больше оксида кремния, чем в цементе. Можно предположить, что превышение содержания оксида кремния не будет давать прибавки к прочности бетона, следовательно, стекло будет иметь активность на 85% ниже цемента, соответственно смесь цемента со стеклом будет иметь такую активность:

$$f_c = 0,85 \cdot 500 + 0,15 \cdot 500 \cdot 0,15 = 425 + 11,25 = 436,25 \text{ кгс/см}^2$$

Далее:

$$f_b = 0,8 \cdot 436,25 \cdot \frac{90}{150} = 209,4 \text{ кгс/см}^2$$

Исходя из ГОСТ 6133-99 полученное нами значение соответствует требованиям, в которых бетонные блоки должны иметь прочность на сжатие не меньше 150кгс/см<sup>2</sup>.

**Выводы по разделу:** блоки с добавлением стеклобоя, как ранее было написано, должны соответствовать ГОСТ 6133-99 по прочности на сжатие без добавления стеклобоя.

Основная масса состава бетонного раствора рассчитана для получения 100 блоков с добавлением стеклобоя.

Для изготовления 100 полнотелых блоков нам понадобится 180кг песка, 229,5кг цемента, 40,5кг стеклобоя, 900 кг щебня, 150кг воды. Был рассчитан состав на производство 100 блоков размеров 390x190x188. В среднем за сутки удастся изготовить до 230 блоков, исходя из количества, полученного стеклобоя нужной фракции в вибрационном истирателе. При расчете состава 15% цемента заменяем на стеклобой.

Стандартное время застывания бетона составляет 28 дней.

Нормальные условия для отверждения — температура +15...+22°C и влажность 60-100%. Исходя из ГОСТ 6133-99 полученное нами значение соответствует требованиям, в которых бетонные блоки должны иметь прочность на сжатие не меньше 150кгс/см<sup>2</sup>.

## 4 Экологическая и экономическая эффективность

### 4.1 Экологическая эффективность

Как было написано ранее, в среднем одна бутылка весит 300гр.

Рассчитаем расход бутылок для приготовления 100 бетонных стеклоблоков.

Из расчетов бетонной смеси мы знаем, что на 100 блоков уходит 40,5кг (следовательно, на 1 блок 405гр) стеклобоя. Цемента потребуется 229,5кг (следовательно, на 1 блок 2,295кг цемента).

$$V_b = B_l : B_b \quad (5)$$

где  $V_b$  – объем использованной стеклотары (на производство 100 блоков);

$B_l$  – вес 100 блоков (40,5кг);

$B_b$  – вес одной бутылки (300гр.)

$$V_b = 40,5 : 0,3 = 135 \text{ шт} / 100 \text{ блоков}$$

На 1 м<sup>2</sup> требуется 72 блока, следовательно, на постройку помещения размером 100м<sup>2</sup> нам потребуется 7200 бетонных блоков с добавлением стеклобоя.

$$P_c = V_{dc} \cdot K \quad (6)$$

где  $P_c$  – требуемый вес стеклобоя на помещение размером 100м<sup>2</sup>

$V_{dc}$  - вес добавленного стеклобоя в 1 блок (405гр.);

$K$  – количество блоков требуемое для производства помещения размером 100м<sup>2</sup>.

$$P_c = 0,405 \cdot 7200 = 2916 \text{ кг}$$

Таким образом, для производства помещения 100м<sup>2</sup> из бетонных блоков с применением стеклобоя нам понадобится 2916кг стеклобоя.

$$P_{ц} = V_{дц} \cdot K \quad (7)$$

где  $P_{ц}$  – требуемый вес цемента на помещение размером  $100\text{м}^2$ ;

$V_{дц}$  - вес добавленного цемента в 1 блок (405гр.);

$K$  – количество блоков, требуемое для производства помещения размером  $100\text{м}^2$ .

$$P_{ц} = 2,295 \cdot 7200 = 16524\text{кг}$$

#### 4.2 Экономическая эффективность

При производстве 100 стеклоблоков нам требуется 40,5 кг стеклобоя и 229,5 кг цемента, вместо 270 кг одного цемента.

При постройке здания в  $100\text{ м}^2$  нам понадобится 2916 кг стеклобоя и 16524 кг цемента [39]. Учитывая, что средняя стоимость цемента 530 р за мешок 50кг. Следовательно, 1 кг цемента будет стоить 10,6 р.

Средняя стоимость стеклобоя (смешанных цветов) 1р/кг. Таким образом, при использовании стеклобоя в качестве замещения цемента будет экономиться 9,2 р за каждый кг. Рассчитаем стоимость затрат на цемент и стеклобой для постройки помещения размером  $100\text{м}^2$ , на которое нам понадобится 7200 блоков.

Стоимость цемента:

$$P_{ц} = P_{ц} \cdot K \quad (8)$$

где  $P_{ц}$  – стоимость(руб) цемента на помещение  $100\text{ м}^2$ .

$P_{ц}$  – требуемый вес цемента на помещение  $100\text{ м}^2$ .

$K$  – количество блоков требуемое на помещение размером  $100\text{м}^2$ .

$$P_{ц} = 16524 \cdot 10,6 = 175154,4\text{ р}$$

Стоимость стеклобоя:

$$P_c = P_c \cdot K \quad (9)$$

где  $P_c$  – стоимость (руб) стеклобоя на помещение  $100\text{ м}^2$ .

$P_c$  – требуемый вес стеклобоя на помещение  $100\text{ м}^2$ .

$K$  – количество блоков требуемое на помещение размером  $100\text{ м}^2$ .

$$P_c = 2916 \cdot 1 = 2916 \text{ р}$$

Если бы мы не заместили 15% цемента стеклобоем, то цемента понадобилось бы 19440кг:

$$P_c = 19440 \cdot 10,6 = 206064 \text{ р.}$$

Рассчитаем размер получившейся экономии

$$\Delta = C_{bc} - C_{cc} \quad (10)$$

где  $\Delta$  – экономия финансовых средств при замещении 15% бетона стеклобоем;

$C_{bc}$  – расход цемента без применения стеклобоя;

$C_{cc}$  – расход цемента с применением стеклобоя.

$$\Delta = 206064 - 175154,4 = 30909,6 \text{ р}$$

Таким образом на замещении 15% цемента на стеклобой при постройке помещения размером  $100 \text{ м}^2$  мы сэкономим 30909,6 рублей.

Естественно, что при модернизации имеющейся технологии предприятие произведет затраты на приобретение нужного оборудования, так же необходимо рассчитывать и амортизацию этого оборудования, электроэнергию; соответственно экономическая эффективность будет немного ниже, но даже при этом, выходя на изготовление гораздо больших объёмов экономический эффект будет достаточно высоким.

#### **Выводы по разделу:**

Рассчитана экономическая (экономия 30909,6 руб. при замещении цемента на 15% стеклобоя при постройке здания размером  $100 \text{ м}^2$ ) и экологическая эффективность (утилизация 2916 кг стеклобоя для постройки помещения  $100 \text{ м}^2$ ).

## Заключение

В представленной выпускной квалификационной работе исследуется вопрос проблемы утилизации стеклобоя путем его использования в заполнителе для бетонов.

Наиболее перспективным способом утилизации стеклобоя за счет индустрии строительных материалов представляется получение связующего и бетонов на его основе, твердеющих при температуре, не превышающей 90° С.

В работах [12–14] были проанализированы условия развития щелочесиликатной реакции в бетонах и установлено, что на результат взаимодействия цементного материала с наполнителем из стеклобоя влияет: - степень дисперсности стекла; - использование аморфного кремнезема в качестве активной дисперсной гидравлической добавки; - химическая модификация стекла, заключающаяся в удалении ионов Na<sup>+</sup> с поверхности в процессе ионообменной модификации поверхности. Авторами [1, 12–13] экспериментально установлено что, размер разрушений и как следствие снижение прочности цементной матрицы, зависит от степени дисперсности вводимого стеклобоя.

Используемая технология переработки стеклобоя не позволяет добиться его нужной фракции для дальнейшего использования в смесях для приготовления стеклоблоков. В следствии этого было предложено технологическое решение модернизации существующей технологии. Рассчитанный материальный баланс доказал эффективность использования стеклобоя определенных фракций в изготовлении стеклолоков..

Исходя из ГОСТ 6133-99 полученное нами значение (209,4кгс/см<sup>2</sup>) соответствует требованиям, в которых бетонные блоки должны иметь прочность на сжатие не меньше 150кгс/см<sup>2</sup>, также рассчитана экономическая (экономия 30909,6 руб. при замещении цемента на 15% стеклобоя при

постройке здания размером 100м<sup>2</sup>) и экологическая эффективность (утилизация 2916кг стеклобоя для постройки помещения 100м<sup>2</sup>).

Проведен расчет прочности бетона на сжатие, который показал, что исходя из ГОСТ 6133-99 полученное нами значение соответствует требованиям, в которых бетонные блоки должны иметь прочность на сжатие не меньше 150кгс/см<sup>2</sup>.

Оптимальное использование стеклянных отходов заключается в применении их в качестве заполнителя для бетона. Наиболее эффективное применение – крупный заполнитель или сырье для переработки в пеностекло.

Технико-экономическая эффективность применения строительных композитов на основе стеклобоя обуславливается тем, что компоненты, используемые в качестве составных частей композиций, являются отходами промышленных производств. В соответствии с этим стоимость сырьевых материалов оказывается значительно ниже стоимости сырья для производства аналогичных изделий, на основе широко используемых в строительстве связующих и заполнителей.

Следовательно, строительные материалы на основе стеклобоя – инновационная продукция, внедрение в производство которой может принести существенный экономический и экологический эффект. Энергосберегающая технология изготовления материалов на основе стеклобоя чрезвычайно проста, не требует специального оборудования и позволяет организовать производство на свободных площадях действующих предприятий стройиндустрии без существенных капиталовложений.



## Список используемых источников

1. Абдулаева З. М. Основы экономики капитального строительства: учебное пособие / З. М. Абдулаева, З. Х. Таймасханов. — Грозный: ГГНТУ, 2022. — 123 с. — ISBN 978-5-6048469-5-7.— Текст: электронный// Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/267875> (дата обращения: 11.11.2023).
2. Алтынова А.Е., Айдарова Н.А., Саркенов Б.Б. Исследование и разработка технологии получения бетона с использованием переработанных отходов стекла // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 4. Ч. 2. С. 20–26. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/51745> (дата обращения: 15.09.2023).
3. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. – М.: АСВ, 2007. – 500 с.
4. Баратов С.Э. Вторичная переработка стекла в России: взгляд изнутри // Наука, техника и образование. 2015. № 3 (9). С. 33–35.
5. Белокопытова А.С. Разработка процессов утилизации стеклобоя путем создания композиционных материалов. // Диссертация канд. техн. Наук: 03.00.16. - М.:РГБ, 2018. С.224.
6. Белоусов Ю.Л. Устойчивость пеностекла на контакте с цементным раствором / Ю.Л. Белоусов, С.В. Алексеев // Строительные материалы. – 1999. – № 7–8. – С. 45–47.
7. Давидюк А.Н. Легкие конструкционно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях. – М.: Изд-во Красная звезда, 2008. – 132 с.
8. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. М.: Феникс. 2007. 368 с.
9. ГОСТ 6133-99 камни бетонные стеновые.
10. ГОСТ 31189–2003. Смеси сухие строительные. Классификация.

11. ГОСТ 31357–2007. Сухие строительные смеси на цементном вяжущем. Общие технические условия.

12. ГОСТ 31356–2007. Сухие строительные смеси на цементном вяжущем. Методы испытаний.

13. ГОСТ 31358–2007. Сухие строительные смеси наполненные на цементном вяжущем. Технические условия.

14. Зайцева А.А. Эффективный газобетон для тепловой изоляции трубопроводов. Строительство – формирование среды жизнедеятельности: Сборник трудов Восемнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. М.: НИУ МГСУ, 2015. С. 853–855.

15. Зеленев Е.А. Использование стеклобоя как вторичного заполнителя в составе цементного бетона/ Е. А. Зеленев, В. В. Белов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». — 2022. — № 4. — С. 12-20. — ISSN 2658-7459. — Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/332483> (дата обращения: 15.11.2023).

16. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях // М.: Стройиздат, 1993. –182 с.

17. Иванов К.С., Иванов Н.К. Неавтоклавные ячеистые бетоны на основе шлакощелочных вяжущих и диатомита // Строительные материалы. – 2004. – № 8. – С. 42–43

18. Изотов В.С. Химические добавки для модификации бетона: монография / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М.: КГАСУ, 2006. – 244 С.

19. Изотов В.С. Особенности щелочной коррозии и высолообразования в бетонах на смешанных вяжущих // Строительные материалы и технологии. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2003. № 1. С. 68–69. 25. Петропавловская В.Б., Баркая Т.Р.

Пустотелые бетонные блоки с рециклинговым наполнителем // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 69–75.

20. Кетов А.А., Кетов П.А., Пузанов С.И. Несортированный стеклобой - проблемы и решения // Стекло мира. - №6.- 2006.- 48-54.

21. Кетов П.Л., Корзапов В.С., Пузанов СИ. Использование вяжущих свойств дисперсных силикатных стекол при утилизации стеклобоя // Строительные материалы. – 2007. – № 5. – С. 2–3.

22. Кетов П.А. Минимизация негативного воздействия на окружающую среду отходов стекла путем использования в строительстве. Дисс... канд. техн. наук. Пермь. 2019. 154 с.

23. Кузнецов В. Г. Новые конструкционные материалы: учебное пособие / В. Г. Кузнецов, Г. А. Аминова. — Казань: КНИТУ, 2020. — 472 с. — ISBN 978-5-7882-2812-9. — Текст: электронный// Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/196133> (дата обращения: 22.10.2023).

24. Легкие бетоны: проектирование и технологии / А. Шорт, П.В. Авелес, Б.К. Бардхен-Рой и др.; пер. с англ. В.З. Мешкова / под ред. В.Н. Ярмаковского. – М.: Стройиздат, 1981. –210 с.

25. Мелконян Р.Г. Экологические и экономические проблемы утилизации стекла / Р.Г. Мелконян // «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр»: I междунар. конференция. Москва, 16—18 сентября 2022 г. М.: Изд-во РУДН, 2002. С. 158–158.

26. Мелконян Р. Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учебное пособие / Р. Г. Мелконян, С. Г. Власова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 101 с.

27. Минько Н.И., Калатоzi В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2018, №1.-с.83-89.

28. Морозова Н.Н., Хозин В.Г. Проблема щелочной коррозии бетонов в Республике Татарстан и пути ее решения // Строительные материалы и технологии. Известия № 4 (16), 2022 Вестник Тверского государственного технического университета Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии» 18 Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2005. № 2 (4). С. 58–63.

29. Нанотехнологии при производстве пеностеклянных строительных материалов нового поколения // Строительство: новые технологии - новое оборудование. - №1.- 2010.- 15-19.

30. Никонов А.С. Разработка теплоизоляционного материала с высокими эксплуатационными свойствами из отходов листового стекла. Дисс... канд. техн. наук. Иваново. 2017. 115 с.

31. Олюнин В.В. Переработка нерудных строительных материалов. – М.: Недра, 1988. – 232 с.

32. Патент РФ 2606486. Способ изготовления стеновых изделий на основе жидкого стекла и стеклобоя методом электропрогрева / Логунин А.Ю., Соков В.Н., Бегляров А.Э.; Заявл. 31.12.2014. Опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1. 15. Зайцева А.А., Самченко С.В. Использование несортированного боя стекла в производстве теплоизоляционных материалов. Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию выдающегося ученого-материаловеда Юрия Михайловича Баженова. М.: МИСИ – МГСУ. 2020. С. 232–236. URL: [https:// mgsu.ru/ resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/](https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/) (дата обращения: 15.06.2022).

33. Попов М.Ю. Щелочесиликатная коррозия в легких бетонах на цементном вяжущем с пористым заполнителем на основе гранулированного пеностекла / М.Ю. Попов, Б.Г. Ким, В.Е. Ваганов, А.С. Брыков // Цемент и его применение. – 2015. – № 4. – С. 89–93.

34. Пузанов С.И. Особенности использования материалов на основе стеклобоя как заполнителей портландцементного бетона // Строительные материалы. 2007. № 7. С. 12–15.

35. Пузанов С.И., Кетов А.А. Комплексная переработка стеклобоя в производстве строительных материалов // Экология и промышленность России. 2009. № 12. С. 4–7.

36. Пузанов С.И., Кетов А.А. Исследование влияния дисперсности силикатных систем на прочностные характеристики вяжущих композитов на основе жидкого стекла // Химия и экология: Тезисы областной конференции. -Пермь. - 2005.- С. 75-76.

37. Пузанов С.И., Россомагина А.С., Кетов А.А. Использование вяжущих свойств дисперсного стекла при утилизации стеклобоя // Инновационный потенциал естественных наук: в 2 т Труды междунар. научн. Конф. / Перм. Университет, Естественнонаучный ин-т — Пермь, 2006. Т. 1.- С.33-36.

38. Саулин Д.В. Исследование щелочесиликатного взаимодействия пеностекольных наполнителей с цементным вяжущим // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2017. № 1. С. 89–104.

39. Слюсарь Н.Н. Возможности извлечения отложенных ресурсов из массивов захоронения твердых коммунальных отходов // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика.- 2016.- № 1.- С. 63- 78.

40. Технология минеральных теплоизоляционных материалов и легких бетонов / К.Э. Горяйнов, К.Н. Дубенецкий, С.Г. Васильев и др. – М.: Стройиздат, 1976. – 536 с.

41. Трофимов Г. В. Профессиональные секреты переработки стеклобоя // Твердые бытовые отходы. - 2017.- №10.- С. 22-26.

42. Управление техногенными отходами: учебное пособие / В. Н. Коротаев, Н. Н. Слюсарь, Я. А. Жилинская [и др.]. — Пермь: ПНИПУ, 2016. — 390 с. — ISBN 978-5-398-01541-6.— Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/161217> (дата обращения: 15.11.2023).

43. Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Черкасов С.В. Проблемы и перспективы сбора и переработки боя стекла и применение изделий на его основе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. Т. 4. № 9. С. 14–20.

44. Шестеркин М.Н. Ячеистый бетон неавтоклавногo твердения на основе стеклобоя. Дисс.... канд. техн. наук. Москва. 2002. 197 с.

45. Byars E.A., Zhu H., Meyer C. Use of glass for construction products: legislative and technical issues // Sustainable Waste Management: Proceedings of the International Symposium 9–11 September 2003, Dundee UK. P. 827–838.

46. Dhir R.K., Dyer T.D., Tang M.C. Expansion due to alkali-silica reaction (ASR) of glass cullet used in concrete // Sustainable Waste Management: Proceedings of the International Symposium 9–11 September 2003, Dundee UK. P. 751–760.

47. Dyer T.D., Dhir R.K. Use of glass cullet as a cement component in concrete // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 157–166.

48. Meland I., Dahl P.A. Recycling glass cullet as concrete aggregates, applicability and durability // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 167–177.

49. Remarque W., Heinz D., Schleusser C. Glass powder as a reactive addition for blast furnace cements // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 229–238.

50. Sugiyama M. The experiment on compression strength and freeze-thaw resistance of the concrete which mixed the tile clip // Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium 19–20 March 2001, Dundee UK. P. 189–194.