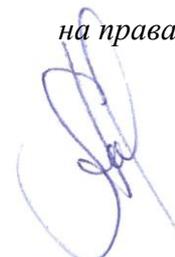


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

на правах рукописи



Никонов Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ
ИЗ ОТХОДОВ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА**

Специальность 05.23.05 - Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, Панов Юрий Терентьевич

Владимир - 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	
1.1. Краткий исторический очерк	8
1.2. Виды и свойства пеностекла	9
1.3. Область применения пеностекла	16
1.4. Технологии получения пеностекла	19
1.5. Задачи исследования	42
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	
2.1. Объекты исследований	44
2.2. Методы исследований	45
2.2.1. Определения водопоглощения	45
2.2.2. Определения прочности при сжатии	46
2.2.3. Определения кислотности образцов	47
2.2.4. Определения сорбционной влажности	48
2.2.5. Определения паропроницаемости	49
2.2.6. Определения размера частиц лазерной дифракцией	51
2.2.7. Дифференциально - сканирующая калориметрия	53
2.2.8. Определения общей пористости материала	54
2.2.9. Определения теплопроводности	56
2.2.10. Определение кинетики разложения газообразователей.	58
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ГАЗООБРАЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ	60
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОМАТЕРИАЛА	65
ГЛАВА 5. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННОГО ПЕНОМАТЕРИАЛА	80
ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ	94
ВЫВОДЫ	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время к теплоизоляционным материалам предъявляют высокие требования: они должны соответствовать всем санитарно-гигиеническим нормам и быть экологическими чистыми, являться качественными тепло- и гидроизоляторами; быть способными сохранять эти показатели постоянными на протяжении длительного времени.

Строительство является отраслью, требующей постоянной модернизации как используемых технологий, так и с позиций повышения эффективности материалов, используемых при строительстве и эксплуатации зданий.

Современный рынок утеплителей весьма разнообразен, но не каждый из них соответствует вышеперечисленным требованиям. Основными теплоизоляционными материалами используемыми в настоящее время являются различного рода минеральные ваты и пенополистирол. Органическая теплоизоляция на основе пенопластов имеет низкий класс пожароопасности, при горении выделяет химические вещества опасные для здоровья человека, недолговечна. Минераловатные изделия обладают очень высокой степенью водопоглощения, а использование органического связующего резко снижает эксплуатационные свойства. К одному из недостатков таких материалов относится постепенное саморазрушение их волокон, что так же неблагоприятно сказывается на здоровье человека, и приводит к потере теплоизолирующей способности.

На рынке современных теплоизоляционных материалов пеностекло уникально и обладает неоспоримыми преимуществами перед всеми другими теплоизоляционными материалами. Относится к классу негорючих материалов, сохраняет свои характеристики на всем периоде эксплуатации.

Производимое за рубежом пеностекло обычно черного или серо-черного цвета. Существенным недостатком этого пеностекла, ограничивающим его применение в жилищном строительстве, является наличие запаха сероводорода, плотность получаемого пеностекла от 170 до 250 кг/м³, а так же более высокие температурные режимы получения такого вида пеностекла. Технология получе-

ния пеностекла является наукоемкой и энергозатратной в связи с этим на территории России нет ни одного на сегодняшний момент функционирующего завода. На этом примере наиболее отчетливо видны проблемы современных инновационных технологий. Исходя из выше изложенного, данная работа по разработке рецептуры и технологического процесса исключающих недостатки, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

В процессе выполнения диссертационной работы был проведен обзор научно-технической литературы по технологиям получения, методам модификации составов и свойств неорганических теплоизоляционных материалов, технологических приемов получения и газообразователей используемых в составах пеностекла.

Теоретической основой диссертации стали исследования отечественных и зарубежных ученых, посвященные вопросам структурообразования, методам получения и оптимизации процессов, а так же составам стекломассы и способами ее модификации. Вопросы связанные с разработкой теории теплопроводности и технологии получения теплоизоляционных материалов для строительства нашли отражение в работах классиков Китайгородского А.А., Шилла Ф., Демидовича Б.К., Горлова Ю.П. и современных исследователей Сокова В.Н., Христофорова А.И., Берегового В.А., Щепочкиной Ю.А., Федосова С.В.

Целью работы и задачи исследования. Целью является разработка экологически безопасного пеностекла с низкой плотностью, пригодного для использования в качестве теплоизоляционного материала в строительстве и разработка технологии его получения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка газообразующей системы для получения пеностекла с низкой плотностью, определение оптимальных соотношений компонентов газообразователя и изучения процесса газовыделения таких смесей.
2. Изучение влияния предложенного газообразователя на процесс вспенивания

3. Изучение физико-механических свойства полученного пеноматериала
4. Разработка технологии получения пеноматериала с пониженной плотностью.
5. Выпуск опытной партии.

Научная новизна работы.

На основании проведенных исследований, изучения физических характеристик вспенивания и подбора технологических параметров:

1. Впервые установлены принципы создания пористых материалов с низкой кажущейся плотностью на основе отходов листового стекла, заключающиеся в использовании комплексного газообразователя, один из компонентов которого совмещает температуру размягчения используемого стекла с температурой интенсивного разложения второго компонента.
2. Установлены закономерности процессов вспенивания при использовании комплексного газообразователя и технологические приемы позволившие получить мелкоячеистый пеноматериал с коэффициентом теплопроводности $0,032 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, плотностью 100 кг/м^3 , при сохранении высоких прочностных показателей.
3. Показано, что введение в систему каолина, выполняющего роль нуклеирующего агента, приводит к понижению среднего размера пор и, как следствие, повышению эксплуатационных свойств пеноматериала.

Теоретическая и практическая значимость и реализация результатов работы

Значимость работы заключается в теоретическом обосновании и последующей практической разработке состава и технологии получения строительного теплоизоляционного материала с кажущейся плотностью 100 кг/м^3 на основе отходов листового стекла. Использование принципа создания пористых систем низкой плотности путем использования комплексных газообразователей позволяющих совмещать температуру разложения основного газообразователя и температуру размягчения вспениваемого материала, позволило разработать технологию получения теплоизоляционного пеноматериала на основе отходов стекла

с пониженной кажущейся плотностью и повышенными эксплуатационными характеристиками.

Спроектирована и на базе предприятия «НПО «Трансполимер» (г. Костерево Владимирской области) изготовлена опытно-промышленная установка непрерывного действия, позволяющая получать пеноматериал шириной 900 мм и толщиной 200 мм. Выпущена опытная партия теплоизоляционного материала на основе отходов стекла плотностью 100 кг/м^3 , которая была использована в качестве теплоизоляции при строительстве жилых зданий.

На выпускаемую продукцию зарегистрирован товарный знак «Стеклозит», получены заключения СЭС, НИИМОССТРОЙ, ПОЖТЕСТ. Пеностекло «Стеклозит» включено в реестр новых технологий архитектуры города Москвы.

Получен патент №2417958, на изобретение «Способ получения пеностекла и состав для получения пеностекла».

Методология и методы диссертационного исследования.

Методологической основой диссертационного исследования послужили современные теории и практика разработки и создания вспененных материалов на неорганической основе. При проведении научных исследований применялись стандартные средства измерений и методы анализа физико-механических свойств вспененных неорганических материалов, полученных с использованием современных методов дифференциально-сканирующей калориметрии, лазерной дифракции и современного испытательного оборудования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Принципы создания комплексных газообразователей состоящих из двух и более компонентов позволяющих совмещать температуру разложения основного газообразователя и вспенивающегося материала.
2. Способы получения пеноматериала с равномерной мелкоячеистой структурой, что обеспечивает создание материала с высокими физико-механическими свойствами.

3. Разработанную на основе полученных экспериментальных данных технологию получения непрерывного полотна пеноматериала со стабильными физико-механическими свойствами и минимальным количеством отходов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности результатов исследований и выводов по работе подтверждена регулярной повторяемостью результатов экспериментальных данных, полученных с применением комплекса эффективных методов исследования. Выводы и основные тезисы получили положительную оценку и внедрены в строительную отрасль.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция "Исследования и инновации в строительстве" (Пенза, ПГУАС, 2012г.); XIV Международная научно-техническая конференция "Наукоемкие химические технологии - 2012" (Тула, МИТХТ, ТГПУ, 2012г.); XIII Международная научно-практическая конференция " Проблемы энергосбережения в промышленности и жилищно-коммунальном комплексе" (Пенза, ПГУАС, 2012г.); Международная научно-техническая конференция "Инновационные материалы и технологии" (Белгород, БГТУ, 2011г.); XII Всероссийская научно-техническая конференция "Новые химические технологии: производство и применение" (Пенза, ПГУ, 2011г.); Молодежная конференция "Международный год химии" (Казань, КГТУ, 2011г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 статьи в центральных изданиях из перечня рекомендованных ВАК РФ и патент РФ на изобретение «Способ получения пеностекла и состав для получения пеностекла» №2417958.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Краткий исторический очерк

Впервые в мире о пеностекле как о строительном материале упомянул в своём докладе академик И. И. Китайгородский на Всесоюзной конференции по стандартизации и производству новых материалов в Москве в 1932 году. Вскоре в СССР была предложена технология и намечены области применения пеностекла [45].

Впервые в мире о пеностекле как о строительном материале упомянул в своём докладе академик И. И. Китайгородский на Всесоюзной конференции по стандартизации и производству новых материалов в Москве в 1932 году. Вскоре в СССР была предложена технология и намечены области применения пеностекла [45].

В 30-е годы прошлого века начаты интенсивные работы и получены патенты на изготовление пеностекла во многих странах Европы (Франция, Чехословакия, Англия и Германия. В годы второй мировой войны исследования и технологические работы были свернуты повсеместно за исключением США. Это позволило Соединенным Штатам в период войны освоить крупнотоннажное производство пеностекла, преимущественно для нужд военно-морского флота, а затем на многие годы выйти в лидеры в производстве и исследованиях в данной технологии[2].

В результате планомерных исследований в Советском Союзе в 70-е годы работало четыре завода по производству пеностекла. Технология была хорошо отлажена, печь по производству пеностекла показана на рисунке 1[3].

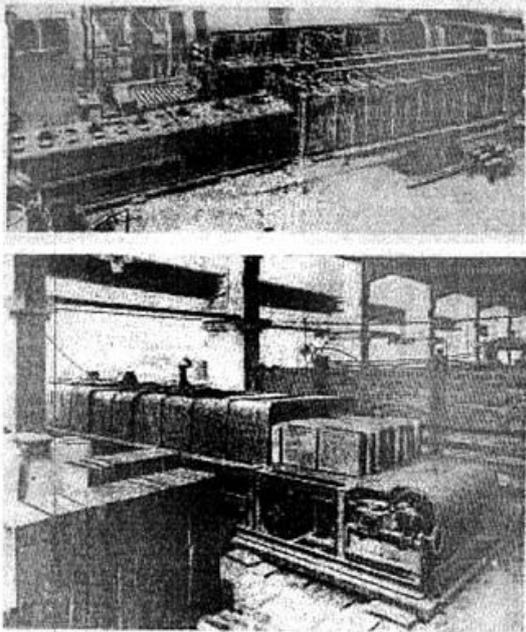


Рисунок 1 - Производственные печи для получения пеностекла.

Нельзя сказать, что о пеностекле в тот период времени строители слышали только как о каком-то фантастическом материале. Общий объем выпускаемой продукции еще в начале 70-х годов превышал 100 тысяч кубометров в год, что в тот период времени было неплохим показателем. Материал пользовался заслуженным спросом и широко использовался в промышленности и строительстве, преимущественно на особо ответственных участках.[44]

К сожалению, сложность поддержания технологических параметров, приводившая к невысокому выходу товарного продукта, и высокая энергозатратность существовавшей технологии привели к нерентабельности и закрытию в период кризиса конца 80-х годов трех заводов, находившихся в России. Единственный функционирующий на сегодняшний день из существовавших в бывшем Советском Союзе заводов находится в Белоруссии – в Гомеле и успешно работает и наращивает объемы выпуска пеностекла.

1.2. Виды и свойства пеностекла

Пеностекло – высокотемпературный теплоизоляционный материал, который наряду с другими теплоизоляционными материалами на основе неорганических материалов (керамобетонов [110], кремнистых горных пород [111] и т.д.) находят в настоящее время все большее применение.

Пеностекло представляет собой, вспененную стекломассу в которой ячейки газовой среды разделены тонкими пленками стекла. Размер ячеек пеностекла варьируется от нескольких миллиметров до сантиметра. Цвет материала от светло-кремового до черного (обычно зеленовато-серый), но в зависимости от состава стекла и примесей может приобретать практически любые цвета. Так же как и стекло, пеностекло не растворяется в воде, обладает стойкостью к действию

большинства кислот и любых растворителей органического типа, выдерживает повышенные температуры.[3]

В сравнении с традиционными теплоизоляционными материалами, основные уникальные свойства пеностекла заключаются в низкой теплопроводности при высокой прочности, удобстве обработки, при этом пеностекло является экологически безопасным и долговечным материалом.

Вспененное стекло содержит в своем объеме менее 10% твердой фазы, поэтому имеет невысокую плотность. Пеностекло можно получать с плотностью от 100 до 600 кг/м³. [4] Снижение плотности ниже указанного предела сопряжено с технологическими трудностями и слишком малое содержание твердой фазы в объеме материала приводит к невысокой прочности изделий и осложняет работу при монтаже и транспортировке. Увеличение плотности более 600 кг/м³ приводит к очень высокой прочности изделий и сложности их обработки. Поэтому преимущественно производится материал с плотностью 160-250 кг/м³. Такое пеностекло обладает высокими теплоизоляционными свойствами, сохраняя при этом приемлемые прочностные характеристики и простоту обработки.[45]

В общем плотность пеностекла практически однозначно определяет его теплопроводность и прочность.[44] Пеностекло получается в результате размягчения исходного стекла, оно не содержит микропор, которые могли бы абсорбировать влагу из окружающей среды, но и не делает материал «дышащим» что не благоприятно сказывается на его эксплуатации в жилых зданиях. Вся влага, которая может задержаться в стеклянных пузырьках при погружении материала в воду, легко стекает из материала после удаления его из воды. Поэтому для всех видов пеностекла обычно наблюдается незначительная величина водопоглощения и зависит она преимущественно от размера и характера пузырьков в пеностекле.

Таким образом, все свойства пеностекла определяются его структурой, представляющей собой оплавленные пузыри стекла, заполненные газами. Отличия в типах пеностекла определяются такими факторами, как величина ячеек, тип стекла, наличие большего или меньшего количества свободных дефектов в перемычках между ячейками. Трудно представить другой доступный теплоизоляци-

онный материал, исключая изделия специального назначения, который мог бы выдерживать прямой факел с температурой более 1000°C.[51]

Демидович Б.К. в своих монографиях [2,3] приводит характеристики различных видов пеностекла, выпускавшихся или планировавшихся к выпуску в Советском Союзе. Это пеностекло влагозащитное, строительное, декоративное, акустическое и гранулированное.

С конструкционной точки зрения материал может выпускаться в трех принципиально отличающихся видах: блоках (или плитах), гранулах (строительный песок или гравий) и бесформенных кусках (строительный щебень). При этом свойства пеностекла, как материала, остаются практически одинаковыми для всех типов изделий.

Разновидности ячеистого стекла (пеностекла): изоляционно-строительное, применяемое для утепления ограждающих конструкций зданий; изоляционно-монтажное, применяемое для тепловой изоляции оборудования и установок умеренного и глубокого холода, промышленных установок, теплопроводов с рабочей температурой до 400°C; влагозащитное, характеризующееся водопоглощением за 360 суток не более 1,8% по объему; специального назначения (бесщелочное) и высококремнеземистое, применяющееся высокой прочностью, термостойкостью, радиопрозрачностью (температура применения до 600 °С, для бесщелочного пористого стекла и до 1200°C для высококремнеземистого); акустическое (звукопоглощающее); фильтрующее, характеризующихся мелкой сообщающейся пористостью.[4]

Если звукопоглощающее и фильтрующее ячеистое стекло должно иметь открытую сообщающуюся пористость, то при производстве остальных видов стремятся получать мелкопористую структуру с равномерно распределенными порами замкнутого типа. В таблице 1 представлены некоторые свойства различных типов ячеистого стекла.[4]

Таблица 1. Типы и основные характеристики ячеистого стекла.

Показатель	Типы ячеистого стекла			
	изоляционно-строительное	Изоляционно-монтажное	бесщелочное	влагозащитное
Средняя плотность	130 - 250	130 - 160	350 - 500	140 - 180
Теплопроводность при 0°C , Вт/(м $^\circ\text{C}$)	0,06 - 0,087	0,053 - 0,07	0,1 - 0,125	0,06 - 0,07
Прочность, МПа: при сжатии при изгибе	0,8 - 2,0	0,5 - 0,8	3 - 5	0,6 - 0,9
	0,5 - 1,0	0,3 - 0,4	1,0 - 1,5	0,4 - 0,6
Температура применения, $^\circ\text{C}$	400	от 400 до -160	600	-

Характер пористой структуры вспененного стекла направленно изменяют путем изменения химического состава сырья, подбора газообразователя, его дисперсности и расхода, а также при помощи изменения режима спекания, влияя на интенсивность газоразложения и реологические показатели (вязкость) вспениваемой стекломассы.

Средняя плотность пеностекла регулируется изменением температуры и времени вспенивания, подбором газообразователя, степенью дисперсности порошков стекла и газообразователя. Зависимость кажущейся плотности от температуры вспенивания для разных газообразователей и от продолжительности вспучивания, а также от дисперсности шахты приведена на рисунке 2 [44].

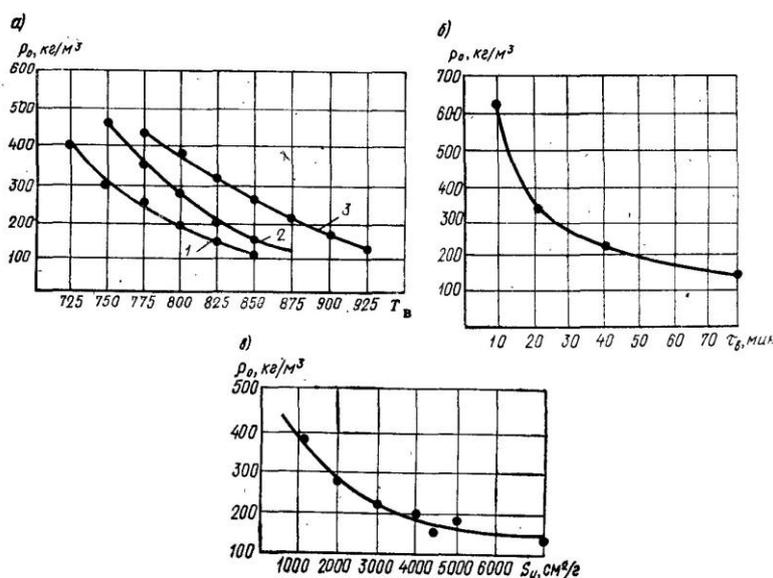


Рисунок 2 - Зависимость кажущейся плотности пеностекла:
 а) от температуры вспенивания T_b при различных газообразователях;
 б) от времени вспенивания τ_b ;
 в) от удельной поверхности шихты; 1-антрацит, 2-сажа, 3-кокс.

Зависимость прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$) пористого стекла от кажущейся плотности ($\rho_{ср}$) в пределах 150 - 700 кг/м³, представлена формулой, МПа:

$$\sigma_{сж} = (0,2\rho_{ср} - 20) \cdot 0,1 \quad (1)$$

Водопоглощение вспененного стекла зависит в основном от характера его пористой структуры: оно достигает 70 - 80% (по объему) у материала с сообщающимися порами. По отношению к длительному воздействию воды стойкость ячеистого стекла велика и определяется гидролитическим классом стекла. Гигроскопичность очень мала и исчисляется долями процента по объему.[50]

Морозостойкость пеностекла достаточно высока, если его поверхность дополнительно защищена от увлажнения и, следовательно, от последующего деструктивного воздействия льда на поверхностных открытых порах.

Коэффициент теплопроводности ячеистого стекла относительно невысока – 0,055 - 0,085 Вт/(м·°С). Этому способствует стеклообразное строение межпоровых перегородок, замкнутые мелкие поры изоляционно-монтажного пеностекла[49].

Все виды пеностекла характеризуются высокой биостойкостью. Материал легко поддается механической обработке (пилению, шлифовке, сверлению и т.п.) Исторически сложилось, что для производства пеностекла использовали сульфат-содержащие стекла. В монографии Б.К. Демидовича показаны результаты исследований именно с такими свойствами. Своими расчетами автор доказывает, что при восстановлении Na₂SO₄ углеродом в атмосфере водяных паров в силикатном стекле реакция имеет вид: Na₂SO₄+2C+SiO₂+H₂O=Na₂SiO₃+2CO₂+H₂S [49].

Следует отметить, что в соответствии с приведенными Б. К. Демидовичем расчетами в случае отсутствия или малого количества водяных паров, наиболее вероятным путем восстановления сульфатов является образование сульфидов: Na₂SO₄ + 2C=Na₂S + 2CO₂[2].

Во всех таких случаях основным, с точки зрения химии, является тот факт, что окисленная сера S^{+6} , количество которой в обычных силикатных стеклах не представляет проблем для конечного потребителя, в случае получения пеностекла переходит в восстановленную серу S^{-2} . В этом случае последняя присутствует в структуре готового пеноматериала либо в виде газа – сероводорода, либо в твердой фазе стекла в виде соединений – сульфидов. Причем сульфиды при взаимодействии с парами воды, содержащимися в воздухе, проходят реакцию гидролиза, при которой в воздух выделяется тот же сероводород в виде газа.[2]

Во всех таких случаях основным, с точки зрения химии, является тот факт, что окисленная сера S^{+6} , количество которой в обычных силикатных стеклах не представляет проблем для конечного потребителя, в случае получения пеностекла переходит в восстановленную серу S^{-2} . В этом случае последняя присутствует в структуре готового пеноматериала либо в виде газа – сероводорода, либо в твердой фазе стекла в виде соединений – сульфидов. Причем сульфиды при взаимодействии с парами воды, содержащимися в воздухе, проходят реакцию гидролиза, при которой в воздух выделяется тот же сероводород в виде газа.[2]

Использование пеностекла, полученного из сульфатного стекла, с содержанием сероводорода, в жилищном строительстве сопряжено с определенными ограничениями. По причине этого усилия ряда исследований были направлены, в течение длительного времени, на разработку технологии пеностекла из низкосульфатного и безсерного стекла. Принципиальная возможность использования реакций без участия серосодержащих соединений была показана Демидовичем, но на практике такая замена предполагает серьезные изменения в технологической линии, что не всегда оправдано экономически особенно при высоком спросе даже на пеностекло содержащее сероводород. Поэтому цель создания технологии бессернистого пеностекла целесообразнее ставить на вновь создаваемых производствах.[3]

Другой характеристикой вспененного стекла, отличающейся у различных производителей, является коэффициент паропроницаемость пеноматериала. Далее представлено сравнение различных типов теплоизоляционных материалов в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение различных типов теплоизоляционных материалов применяемых в настоящее время

Характеристики	Пеностекло марки «FOAMGLAS»	Пеностекло г. Гомель	Пенополистирольные плиты ПСБ-С-25	Экструзионные плиты «Пеноплэкс»	Минеральный утеплитель жесткий
Плотность, кг/м ³	160-250	170-190	15-35	35-45	150-200
Коэффициент теплопроводности, Вт/м°К	0,04-0,1	0,048	0,033-0,037	0,04	0,05-0,06
Прочность на сжатие, МПа	0,7-4,0	не менее 0,7	0,05-0,16	0,25-0,5	0,025-0,03
Водопоглощение, % об., не более	2	5	1	0,1-0,2	1,5
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м*ч*Па)	0	0,001-0,005	0,014	0,008	0,53
Стабильность размеров	отличная	дает усадку при длительной эксплуатации	дает усадку	дает усадку	Отличная
Характеристики	Пеностекло марки «FOAMGLAS»	Пеностекло г. Гомель	Пенополистирольные плиты ПСБ-С-25	Экструзионные плиты «Пеноплэкс»	Минераловатный утеплитель жесткий
Верхний температурный режим эксплуатации	450-550		80	200-500 (в зависимости от связующего)	Минеральные волокна выдерживают 1000°, связующие компоненты разрушаются при 250°С
Огнестойкость	Высокая		нет	нет	нет (при воздействии высокой температуры разрушает связующее)
Пожаробезопасность	Высокая		нет	нет	Теплоизоляция выходит из строя из-за разрушения связки
Стабильность при эксплуатации	время эксплуатации неограниченно		через 10-15 лет наблюдается разрушение материала		через 15-20 лет наблюдается разрушение материала
Экологическая безопасность материала	экологически безопасен		при эксплуатации (особенно при повышенной влажности и температуре) имеет место выделение токсичных компонентов		При эксплуатации идет выделение опасных пылевых компонентов
Технологичность применения	Сочетается с любыми цементными растворами, клеится, штукатурится. Легко обрабатывается столярным инструментом		монтаж гвоздями или полимерными мастиками		Крепится гвоздями, требует жесткого каркаса

ЗАО «Пеноситал» представила технологию, подразумевающую частичную кристаллизацию стекла, что позволяет получить материал, сопоставимый по коэффициенту паропроницаемости с кирпичом.[93]

На практике гражданского строительства считается более перспективным использование паропроницаемых материалов в связи с более комфортными условиями проживания в соответствующих конструкциях. Поэтому соответствующие расчеты по паропроницаемости вошли в требования существующих СНиПов. Специалисты в вопросах теплоизоляции отмечают, что «... для многослойных конструкций вопросы паропроницаемости слоев, переноса, количественной оценки выпадающего конденсата являются вопросами первостепенной важности»[81].

Само по себе стекло, как аморфный оплавленный материал, имеет нулевую паропроницаемость. Однако при частичной кристаллизации пеностекла возможно возникновение микроскопических разрывов в местах наиболее утонченных стенок пузырьков материала.

1.3. Области применения пеностекла

На основании изученных выше свойств пеностекла, возможно определить его области применения. В условиях, когда температура среды ниже 0 °С, выше 50-60 °С, с влажностью воздуха более 50%, использование пеностекла практически не ограничено, при эксплуатации, где бы выполнялись все эти условия, по-

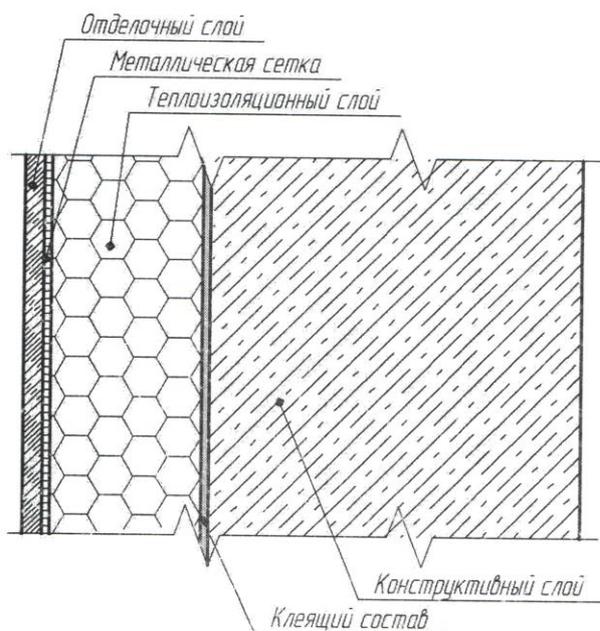


Рисунок 3 - Конструкция стены с наружным слоем теплоизоляции

этому пеностекло можно использовать для теплоизоляции практически любых конструкций и оборудования. В связи с явной нехваткой материала на рынке использование его ограничено. Следует отметить простоту монтажа изделий из пеностекла и сочетаемость его со всеми мастиками и гидроизоляционными материалами. Использование пеностекла для теплоизоляции стеновых конструкций (рис. 3) позволяет добиться высокой надежности конструкции от промерзания, исключить проникновение влаги во внутренние слои материала, и

получить значительную экономию на монтажных работах, так как материал легко крепится любыми мастиками или арматурой непосредственно на стену. Пеностекло можно применять как для теплоизоляции новых, так и для реконструкции существующих зданий. Использование пеностекла в стеновых конструкциях сдерживалось ограничениями по выделению сероводорода и отсутствием паропроницаемости для некоторых видов пеностекла. С решением этих проблем появились возможность практически неограниченного использования пеностекла в любых стеновых конструкциях.[71]

этому пеностекло можно использовать для теплоизоляции практически любых конструкций и оборудования. В связи с явной нехваткой материала на рынке использование его ограничено. Следует отметить простоту монтажа изделий из пеностекла и сочетаемость его со всеми мастиками и гидроизоляционными материалами. Использование пеностекла для теплоизоляции стеновых конструкций (рис. 3) позволяет добиться высокой надежности конструкции от промерзания, исключить проникновение влаги во внутренние слои материала, и



Рисунок 4 - Теплоизоляция трубопроводов

Другой постоянной проблемой современного городского хозяйства является теплоизоляция трубопроводов (рис.4) при температурах теплоносителя выше 60°C.

В этом случае использование пеностекла позволяет отказаться от регулируемой замены теплоизоляции и применять его при температурах до 450-550°C не только в условиях воздействия воздуха и пара, но и нефтепродуктов и масел [71,65].

Вопрос тепловой изоляции фундаментов, особенно в регионах с суровым климатом, должен быть на одном из первых мест. Применение пеностекла уберет фундамент от промерзания, поможет избежать образования конденсата, появления сырости, развития плесени, разрушения несущей конструкции. Утепление подземной части сооружения пеностеклом позволяет ликвидировать или существенно уменьшить влияние сил морозного пучения на фундамент (рис.5).

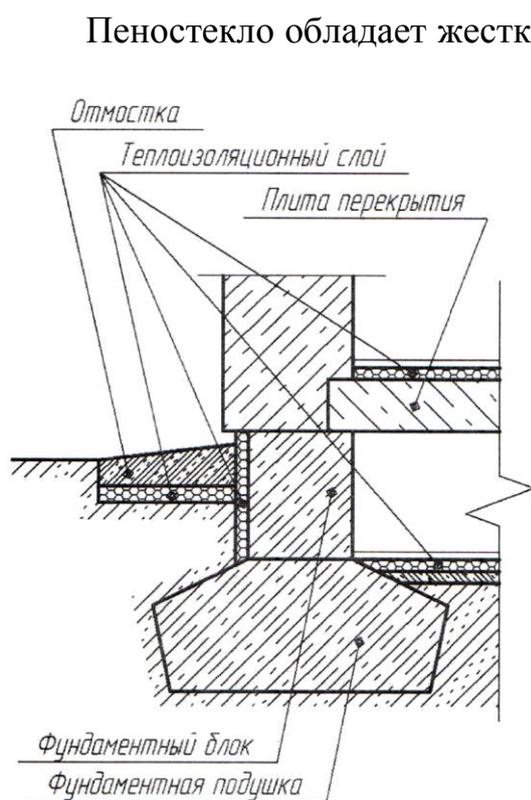


Рисунок 5 - Конструкция утепления фундамента и подвала

Пеностекло обладает жесткостью и безусадочностью, достаточной для того, чтобы при утеплении полов можно было осуществлять непосредственно по плитам перекрытия. Утепление пола пеностеклом, является наиболее эффективным. При этом стоимость общего утепления пола с применением пеностекла, является экономически выгодной (рис.6).

Пеностекло в виде насыпного материала (гравий и щебень) может быть использовано во всех случаях, когда необходима долговечная и прочная насыпная теплоизоляция.

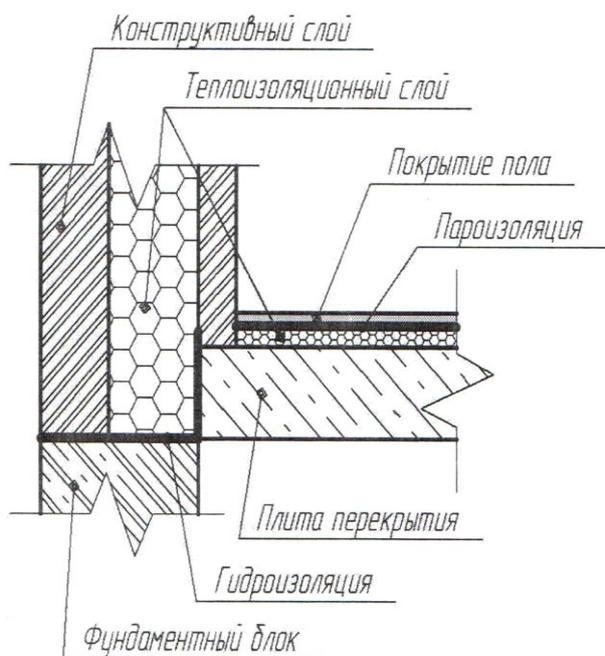


Рисунок 6 - Конструкция утепления пола

Поэтому пеностекло всегда обладает более высокой относительной прочностью в сравнении с другими материалами при одинаковой плотности и относится это не только к насыпному материалу, но и к блочному [69].

Если же говорить о применении насыпного пеностекла, то использовать его можно практически везде, где необходима долговечная и безопасная насыпная теплоизоляция. Это – и теплоизоляция чердачных и межэтажных покрытий, колодцевая кладка, заполнитель в легких бетонах. Теплоизоляция крыш широко применяется в жилых, офисных зданиях и в промышленных объектах. Применение пеностекла с низкой плотностью при высокой прочности в кровельных конструкциях способствует повышению прочности кровли, уменьшению ее прогиба, обеспечивает хорошую устойчивость против ветровых нагрузок (рис.7).

Очевидно, что при сопоставимой плотности и близком значении теплопроводности, пеностекло в 4-5 раз превосходит по прочности керамзит. С точки зрения материаловедения этот факт объясним – пеностекло практически не имеет микропористости в отличие от керамзита, а именно микропористость является причиной развития разрушения материала под нагрузкой. Есть и иные причины, высокой прочности пеностекла, связанные с характером и геометрией распределения ячеек газовой фазы в теле материала.

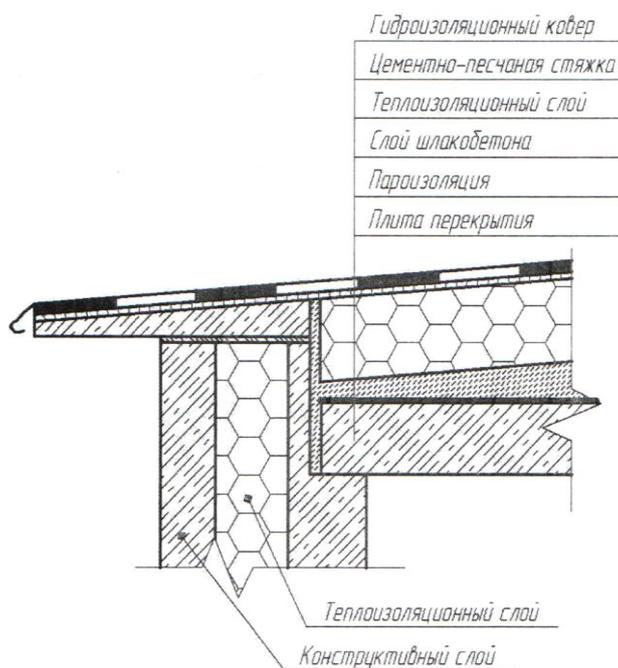


Рисунок 7 - Конструкция утепления крыши

При использовании пеностекла как наполнитель в бетоны необходимо учитывать возможность протекания в бетонах со стеклянным наполнителем щелочно-силикатной реакции, которая может протекать и в обычном бетоне, если наполнитель природного происхождения содержит реакционно способный (обычно аморфный) оксид кремния. Поэтому в случае использования пеностекла в качестве заполнителя, наиболее очевидным техническим решением по подавлению указанного взаимодействия является перевод оксида кремния в менее реакционно способную форму, например, кристаллизация материала. Именно такое решение было предложено и осуществлено в технологии заполнителей производства ЗАО «Пеноситал», о чем сказано на сайте данной фирмы[93]. Материал, частично окристаллизованный уже не склонен вступать в щелочно-силикатную реакцию и проблема может быть успешно решена.

Одним из перспективных направлений в развитии пеностекла является теплоизоляция дорожных покрытий при строительстве автомагистралей. В Европе для утепления дорожных покрытий используют пеностеклянный щебень производимый немецкой фирмой Schaumglas-Schotter [96].

1.4. Технологии получения пеностекла

Физико-химические основы порошкового способа производства изделий из пористого стекла заключается в достижении соответствия между температурами перехода стекла в пиропластическое состояние и начала активного разложения газообразователя [103].

Технология изделий из вспенного стекла, основанная на порошковом способе, предусматривает приготовление тонкомолотой шихты, состоящей из стекла в виде порошка и газообразователя, спекания шихты с одновременной ее вспениванием, закрепление полученной пористой структуры и снятие температурных напряжений, возникающих в изделии при снижении температуры [44]. Особенности получения строительного материала на основе пеностекла с использованием дополнительного декоративного покрытия в качестве защиты структуры рассмотрено в работах [104,105]. В работе [106] рассмотрена принципиальная возможность создания теплоизоляционных материалов в электрогидротеплосиловом по-

ле, а в работе [110] рассмотрена технология получения бесшамотного высокотемпературного теплоизоляционного материала.

Не смотря на это, порошковая технология остается основной при получении теплоизоляционных материалов на основе неорганических материалов [107,108]. Все большее значение приобретают вопросы связанные с проблема рационального использования твердых бытовых отходов путем использования их в производстве эффективных строительных материалов [109].

От тонкой дисперсация шихты ($S_y =$ от 4000 до 5500 см²/г) зависит качество ячеистой структуры (чем тоньше помол исходных веществ, тем меньше пористость) и влияет на время спекания и газообразования (чем большая дисперсность шихты, тем процессы протекают быстрее).

Наиболее важными технологическими процессами является спекание и поризация готовой композиции. Во время этого протекает ряд физических и физико-химических процессов, требующих взаимодействия важнейших факторов, определяющих заданную направленность структурообразования. При температуре активного газовыделения стекломасса должна обладать достаточной вязкостью, обеспечивающей неразрывность образующихся межпоровых перегородок и низким поверхностным натяжением, способствующим утончению этих перегородок. Это соответствие определяется температурой начала активного газовыделения, видом газообразователя и химическим составом стекломассы, определяющим изменение ее реологических свойств при нагревании [45].

Основные факторы, влияющие на стабильность процесса вспенивания стекломассы, должны находиться в интервалах: вязкость стекломассы 2800 - 3500 Па·с, при температуре вспенивания стекла 720 – 930 °С; $3,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м - поверхностное натяжение, с повышением температуры парциальное давление газовой фазы должно нарастать начиная с температуры 50 - 70°С, выше температуры размягчения стекломассы, причем давление газовой фазы должно нарастать постепенно в широком температурном интервале, совпадающим с температурным интервалом, обеспечивающим вязкость стекломассы в рабочем диапазоне. Газообра-

зователи должны отвечать следующим главным критериям: выделение газа должно происходить равномерно в объеме, обеспечивающем достаточное давление; а так же не выделять в процессе вспенивания токсичных продуктов.

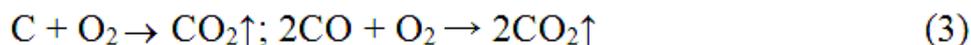
Одними из основных критериев выбора типа газообразователя является температура спекания и интервал вязкости стекла, от требуемой пористости структуры а иногда от окраски продукта [44].

При вспучивании стекла проходят процессы физико-химического и физического характера. Размягчение частиц стекла является физическим процессом; для большинства стекол это проходит при нагреве материала около 600 °С. При этом вязкость стекла достаточно велика и вспенивание практически не происходит. При дальнейшем нагреве снижается вязкость стекломассы и наблюдается спекание массы – процесс физико-химический.

При повышении температуры выше температуры начала размягчения стекольного порошка на 50 - 70°С в случае использования углеродсодержащего газообразователя идут химические реакции между сульфатом натрия, который содержится в стекле, и углеродом[45]:



Дальнейшее повышение температуры интенсифицирует эту реакцию и одновременно снижает вязкость стекломассы, что приводит к ее вспучиванию за счет увеличения газовой фазы. Наряду с этим происходит реакция окисление углерода по схемам:



В случае нехватки кислорода идет реакция восстановления с поглощением теплоты:



В промышленности применяют газообразователи углеродного типа такие как, антрацит, кокс, полукокс, графит, карбид кремния.

С целью изменения свойств пеностекла и его пористости используют в качестве газообразователя карбонатные породы (мрамор, мел, известняк). В этом случае образование газовой фазы проходит по реакции:

замещения, проходит от температуры 600 °С,



разложения, которое начинается при температурах 795-818°С.



Используют и некоторые другие газообразователи, основные виды которых представлены в таблице 3[44].

Таблица 3. Типы газообразующих агентов, используемых при изготовлении ячеистого стекла

Газообразующий агент	Тспек, °С	Необходимое количество газообразователя, % по массе	Строение пор ячеистого стекла	Цвет ячеистого стекла
Пирролюзит (MnO ₂)	680 - 720	3,0 - 5,0	Частично замкнутые	Фиолетовый
Азотокислый натрий (NaNO ₃)	720	1,0 - 3,0	Сообщающиеся	Белый, серый
Мрамор известняк, (CaCO ₃)	760 - 775	0,5 - 1,0	Преимущественно сообщающиеся	Белый
Углеродистый кальций	750 - 760	1,0 - 1,5	Замкнутые	-
Антрацит	770 - 780	2,0 - 3,0	Частично сообщающиеся	Табачно-желтый, темно-серый
Кокс	790 - 800	2,0 - 3,0	Замкнутые	Коричневый до черного
Графит	850 - 900	1,0 - 2,0	Замкнутые	Серый, черный
Карбид кремния (SiC)	850 - 900	1,0 - 3,0	Замкнутые	Серый

Подбирая химический состав стекла, степень его измельчения, применяя разные типы газообразователей, направленно регулируя режим спекания, можно в широких пределах изменять общую пористость, ее характер и, следовательно, свойства изделий из вспененного стекла.

Применение специальных режимов охлаждения вспученной стекломассы позволяет осуществить бездефектную стабилизацию структуры ячеистого стекла

Для предотвращения усадки вспученной массы в первый период, нахождения в пиропластическом состоянии и нет опасности образования трещин, резко повышают вязкость стекла путем снижения температуры на 150 - 180 °С. Далее применяют медленный режим охлаждения (отжиг) с целью перевода стекла в твердое состояние и недопущения при этом термических напряжений, способствующих к растрескиванию изделий [44].

Сырье для производства изделий из ячеистого стекла весьма разнообразно. В качестве сырья могут быть использованы следующие материалы: отходы стекольного производства; бой оконного или тарного стекла; гранулы из специально сваренного стекла; легкоплавкие горные породы, содержащие щелочи.

Использование боя стекла по причине неоднородности его химического состава создает существенные трудности для получения пеностекла со стабильными свойствами. Высококачественное ячеистое стекло получают из гранулята специально сваренного стекла. Однако при этом требуются более дорогостоящие и дефицитные материалы. Снижение стоимости гранулята достигают путем замены кальцинированной соды и глинозема дешевыми щелочесодержащими горными породами и отходами производства – нефелинами, перлитами, золами ТЭС, вулканическими пеплами, легкоплавкими озерными глинами, андезитами и др.

Хорошими свойствами обладают стекла, содержащие в своем составе, % по массе: SiO_2 – 60,0 - 72,5; Fe_2O_3 – 0 - 2,5; CaO – 4,5 - 6,0; MgO – 1,5 - 2,5; Na_2O – 12,5 - 15,0 [44].

Технология изделий из пеностекла имеет разновидности. При использовании стекла в виде боя в технологии, технологический процесс производства пеностекла проходит по неполной схеме. В таком случае исключается печь стекловарения а также отделение подготовки шихты. В основу такого технологического процесса ложатся операции отделения, дробления и очистки боя стекла[44].

Основное большинство предприятий реализует технологический процесс по полной схеме, включающая в себя отделение подготовки сырья для получения

стеклогранулята, отделение приготовления шихты, печь стекловарения, грануляцию стекла, состоящего из сетчатого конвейера, постоянно омываемый водой, на которой из летки выработочной части печи поступает стекольный расплав. В процессе обильного обмывания водой быстро остывающий расплав, распадается на отдельные частицы (гранулы). Газообразователь и гранулы стекла поступают на участок подготовки шихты для производства вспененного стекла. Здесь стеклогранулят и газообразователь подвергаются измельчению в дробилках щекового или молоткового типа до частиц в интервале 1 - 3 мм и после процесса дозировки они поступают на совместное доизмельчение в двухкамерную мельницу непрерывного действия с футеровкой из керамики или кремния и кремниевыми мелющими телами. Помол проводят до получения порошка с S_y от 4000 до 7000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Установки, где стекло вспенивается в формах в отдельных печах вспенивания и отжига, получили наибольшее распространение в мировой практике производства пеностекла. Подобные установки действуют на Лихоборском и Лианозовском заводах (Москва). Этот же принцип положен в основу установок на предприятиях Чехословакии и США.

Порядок работы установок следующий.[44] Формы с шихтой проходят печь для вспенивания рисунок 8, где прогреваются до температуры, достаточной для образования плиты пеностекла. По выходе из печи горячей формы из нее извлекают блок, который подают в печь отжига, а форму повторно заполняют готовой композицией и подают в печь вспенивания.

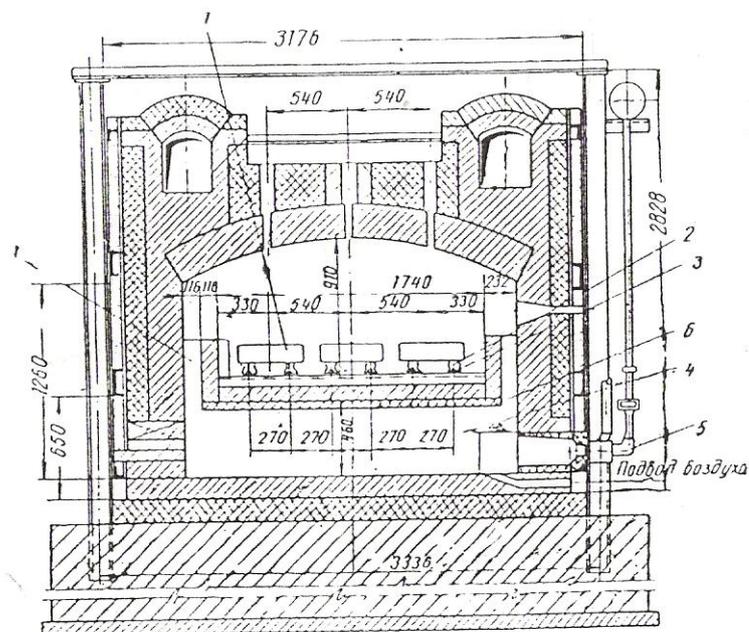


Рисунок 8 - Печь для вспенивания (поперечный разрез)

Формы 1 устанавливают в один или в два ряда по высоте и в три ряда по ширине на ползунки 2. Ползунки по направляющим 3 проталкиваются гидравлическим толкателем. Поскольку формы относительно ползунков неподвижны, их можно изготовлять как с замкнутым контуром, так и разборными.

Печь для вспенивания проходная, полумуфельного типа, с подподовыми топками 4, отапливается природным газом через инжекционные горелки 5. Подподовые топки перекрыты жаростойкими металлическими плитами 6, через которые нагреваются дно форм. Продукты горения по вертикальным каналам 7 проходят в рабочее пространство печи, нагревают верх форм и принудительно движутся к началу печи.

Примерный режим вспенивания стекла в подобной печи представлен на графике рисунке 9.[44]

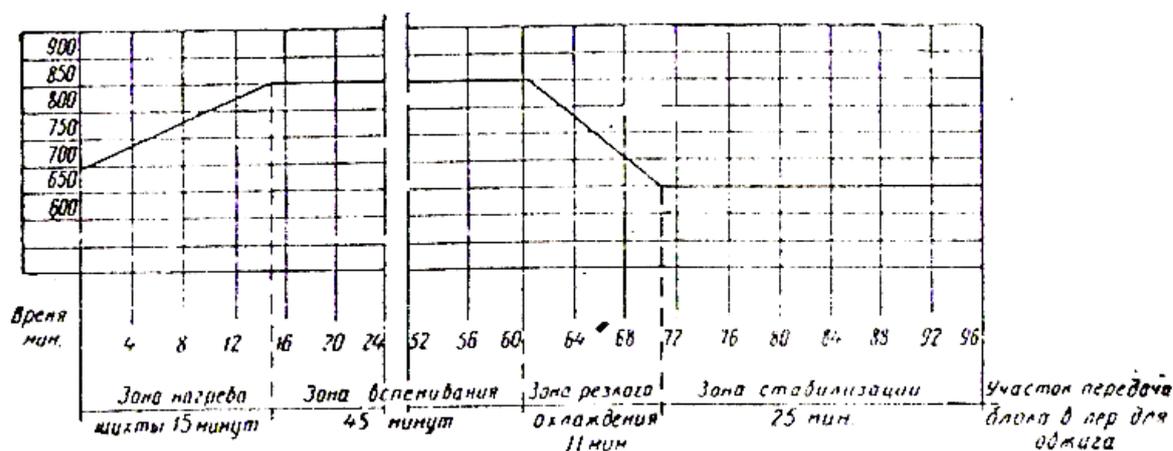


Рисунок 9 - Температурный режим вспенивания пеностекла

Как видно из графика, за зоной вспенивания следует зона резкого охлаждения для фиксирования структуры материала. Поскольку в этой зоне поверхностные слои могут переохладиться, в печи предусмотрена зона стабилизации, в которой температура выравнивается по сечению пеностекляной плиты и по выходе из печи плита имеет равномерную температуру порядка 650°C.

Для отжига блоков можно применять печи типа ЛН 1000*18 или ПО-1800. Еще лучше использовать конвективные печи отжига, которые широко применяются в Чехословакии.

В печах отжига плиты устанавливаются на сетку в положении «на ребро», что значительно повышает производительность печей. Продолжительность отжига плит пеностекла толщиной 100 мм 10-11 час.

Более индустриальным являются установки с объединенными зонами вспенивания и отжига. Здесь формы устанавливают в несколько этажей на вагонетки, которые последовательно двигаются по туннельной печи в зоны вспенивания и охлаждения рисунке 10.[44]

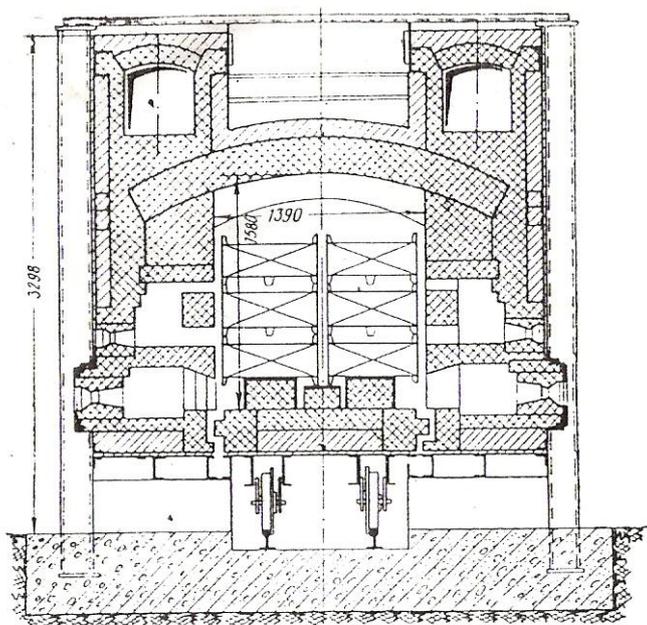


Рисунок 10 - Печь туннельного типа для вспенивания и отжига пеностекла
(поперечный разрез)

Такие печи установлены в цехах Гомельского стекольного завода и Кучинского завода керамических блоков (Московская область). Туннельные печи для производства пеностекла используют также в Польше.

В туннельных печах вспенивание осуществляют в литых формах из жаростойкой стали с замкнутым контуром и двумя вставными днищами.

Перед засыпкой шихты внутренние поверхности формы обмазывают меловой или каолиновой суспензией для предотвращения прилипания пеностекла к металлу. Операции очистки и обмазки форм, а также засыпки шихты производятся на соответствующих позициях специального конвейера, куда формы переносятся с вагонетки таями. На этом же конвейере производится извлечение готовых блоков из форм. Загрузка и выгрузка вагонеток из печи и перемещение их по обгонному пути автоматизированы. Намечается переход к разборным формам, позволяющим получать изделия правильной прямоугольной формы, не требующие опиловки.

Температурный режим туннельной печи Гомельского стекольного завода для газообразователей кокса и торфяного полукокса показан на рисунке 11[45].

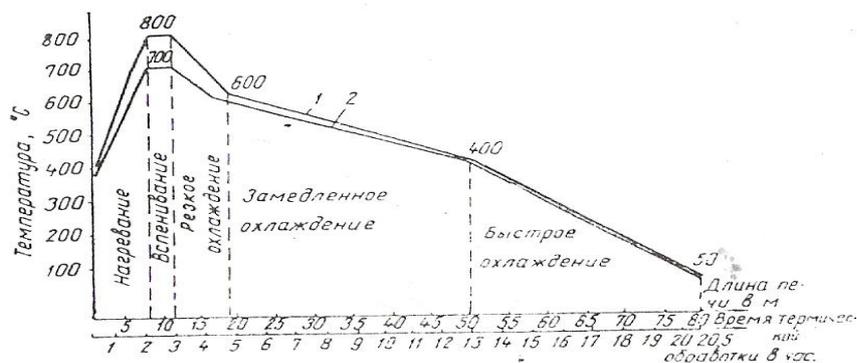


Рисунок 11 - Температурный режим туннельной печи Гомельского стеклозавода 1-газообразователь-антрацит, 2-газообразователь-торфяной кокс

Сравнительная техническая характеристика туннельных печей для производства пеностекла в формах дана в таблице 4.[45]

Таблица 4. Техническая характеристика печей

Элементы характеристики	Печь для вспенивания (отжиг в отдельной печи ПО-1800)	Туннельная печь с объединенными зонами вспенивания и отжига
Производительность в м ³ /год	7000	15000
В том числе плит в м ³ /год	5000	9000
Габариты печи в м:	-	-
длина	15	100
ширина	3,5	3,5
высота	3,0	2,8
Единовременный расход жаростойкой стали в Т	10	150
Удельный расход жаростойкой стали на 1 м ³ пеностекла при эксплуатации в кг	2	2
Расход условного топлива на 1 м ³ пеностекла в кг	180	340

В последние годы велись работы по поиску рациональной конструкции конвейерного оборудования для получения пеностекла без форм. На Гомельском заводе была построена и испытана опытная автоматическая установка АУП-1 по проекту Гипростекло, на которой пеностекло формуют в виде непрерывной ленты, от которой отрезают блоки требуемых размеров. Схема установки приведена на рисунке 12 [45].

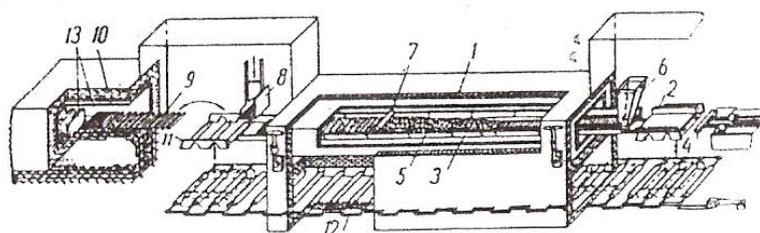


Рисунок 12 - Схема опытной автоматической установки АУП-1

Вспенивание стекла производится в печи 1 на поддонах 2 длиной 1600 мм, шириной 1000мм. Стыкуясь между собой, поддоны образуют общую постель 3, перемещаемую с помощью толкателя 4, на которой и получается непрерывная лента пеностекла 5. шихта из расходного бункера 6 подается на поддоны слоем определенной ширины и толщины. Слой шихты нагревается, вспенивается и прикатывается валком 7. по выходе из печи ленты пеностекла от нее специальным ножом 8 отделяются блоки, которые рольгангом 9 передаются в печь отжига 10. Освобожденные от пеностекла поддоны с помощью подъемника 11 и рольганга 12 передаются обратно к загрузочному концу печи спекания.

Печь отжига представляет собой муфельный лер с верхним и нижним обогревом печного канала. Блоки 13 перемещаются в лере в положении «на ребро» между разделительными штырями, прикрепленными к пластинчатой цепи конвейера. Взаимодействие всех механизмов установки и поддержание заданного теплового режима автоматизировано.

Более совершенная установка подобного типа АУП-2 построена на Саратовском заводе технического стекла [45].

В Государственном институте стекла была построена и испытана опытная конвейерная установка, позволяющая получать непрерывную ленту пеностекла на жаростойкой стальной ленте толщиной 0,8-1,2 мм, перемещающейся с помощью приводного барабана через рабочую полость электрической печи. Схема установки показана на рисунке 13 [44].

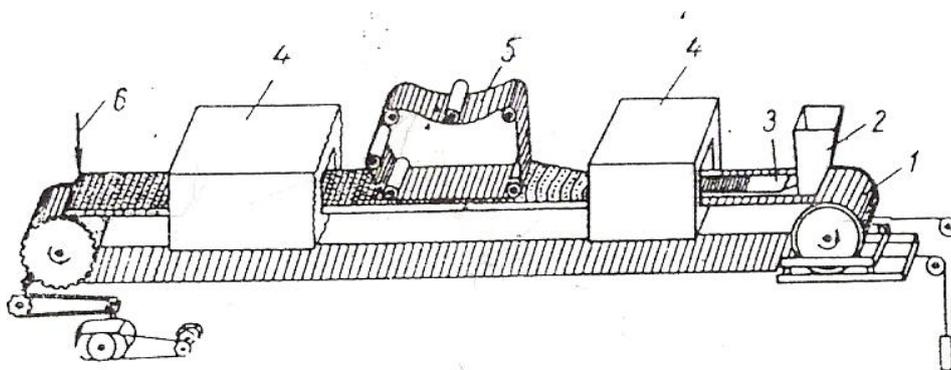


Рисунок 13 - Схема конвейерной установки Института стекла

На стальную транспортную ленту 1 из расходного бункера 2 через питатель 3 непрерывно подается слой шихты, который, пройдя зону вспенивания

электropечи 4, прикатывается верхней стальной лентой 5. После прохождения зоны стабилизации от ленты пеностекла ножом 6 отрезаются блоки заданного размера. По другому варианту лента непрерывно перемещается в печь отжига и плиты отпиливаются от ленты в холодном состоянии.

На основе полученного опыта в настоящее время конструируется опытно-промышленная установка, на которой будут окончательно отработаны все параметры конвейерного процесса.

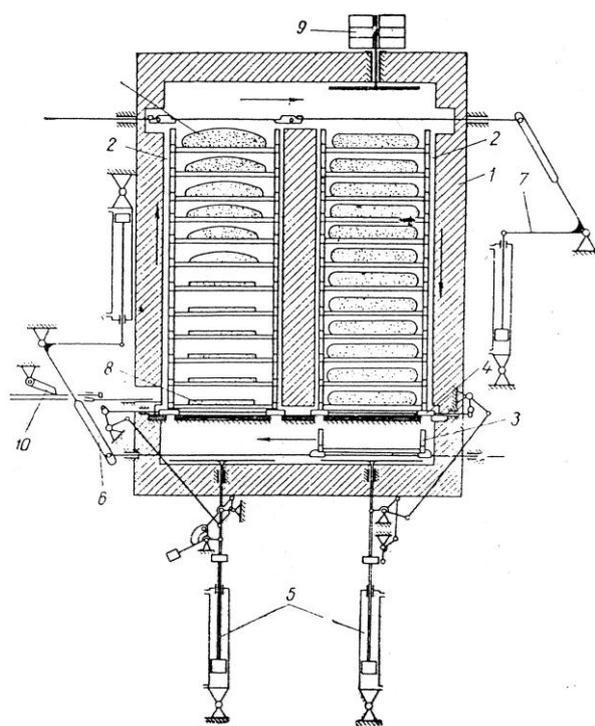


Рисунок 14 - Вертикальная этажерочная печь

Вертикальная этажерочная печь для производства пеностекла без форм сконструирована СКБ Госстроя УССР, представлена на рисунке 14 [44]. Печь 1 представляет собой два вертикальных канала 2, в одном из которых поддоны 3, установленные друг на друга и образующие этажерки, перемещаются вверх, а в другом – вниз. Этажерки установлены на подвижные опоры 4, механически связанные с гидropодъемниками 5. При заталкивании очередного поддона в вертикальный канал опоры отходят и пропускают его.

Горизонтальные перемещения поддонов в верхнем и нижнем горизонтальных каналах производятся специальными приспособлениями 6 и 7 от гидравлического цилиндра. В данной печи намечается использовать брикетированную шихту. Печь может работать по двум режимам.

По первому режиму брикет шихты 8 вспенивается в вертикальном канале и с помощью механизма 9 подпрессовывается; в нисходящем вертикальном канале проходит зону стабилизации и в нижнем горизонтальном канале блок выталкивается в печь отжига. Загрузка очередного брикета производится на первую позицию восходящего канала механизмом 10. По второму режиму в обоих вертикальных каналах поддерживается температура вспенивания. При этом плита оконча-

тельно вспенивается в нижних позициях нисходящего канала и подпрессовку производят при передаче плиты в печь отжига. При работе по второму режиму печь более производительна. Поддоны перемещаются все время при одинаковой температуре и не выходят из печи, что исключает термические удары и делает возможным наряду с металлическими использование керамических поддонов. Во избежание прилипания пеностекла к поддону его рабочую поверхность перед загрузкой брикета посыпают мелким кварцевым песком или глиноземом.

Печь отапливается генераторным или природным газом через серию мелких горелок, подающих продукты горения в каждую полость между поддонами. Производительность печи по второму режиму 7500 м³ пеностекла в год. Благодаря исключительной компактности установки (длина 4 м, ширина 2 м и высота 6 м) рационально сооружать батареи по 5 или 10 печей в ряд. Печь приспособлена к работе по высокотемпературному режиму (1100-1200°С) и поэтому может быть использована для производства специального пеностекла или пенокералита.

Вспенивание стекла и охлаждение (отжиг) полученной продукции проводят либо одностадийным способом (одна печь), либо двустадийным способом в печах вспучивания разогретой массы стекла и печи отжига пеностекла.

В процессе одностадийного получения формы из жаростойких сталей, заполненные готовой композицией, помещают на рельсы, поступающие в печь туннельного типа. Тепловой режим обработки пеностекла представлен на рисунке 15 [3].

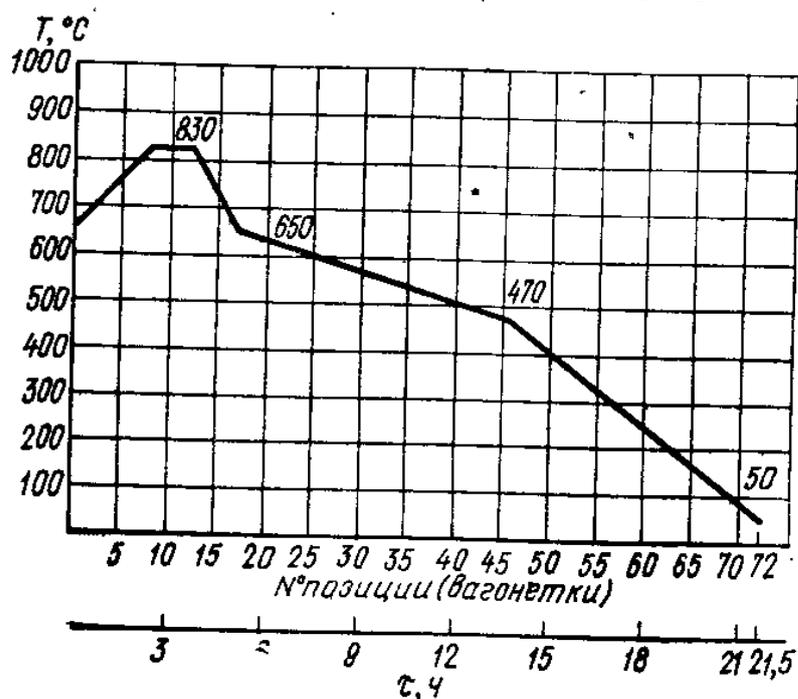


Рисунок 15 - Режим термической обработки пеностекла в туннельной печи

При способе двустадийной обработки, композиция направляется на вспенивание, где подвергается нагреву до температуры, позволяющей образовывать пористую структуру стекломассы, и далее достаточно быстро охлаждается до температуры 600 – 630 °С для фиксации вязкости вспененной стекломассы и стабилизации поднявшейся пеномассы. Режим работы печи вспенивания приведен на рисунке 16 [44].

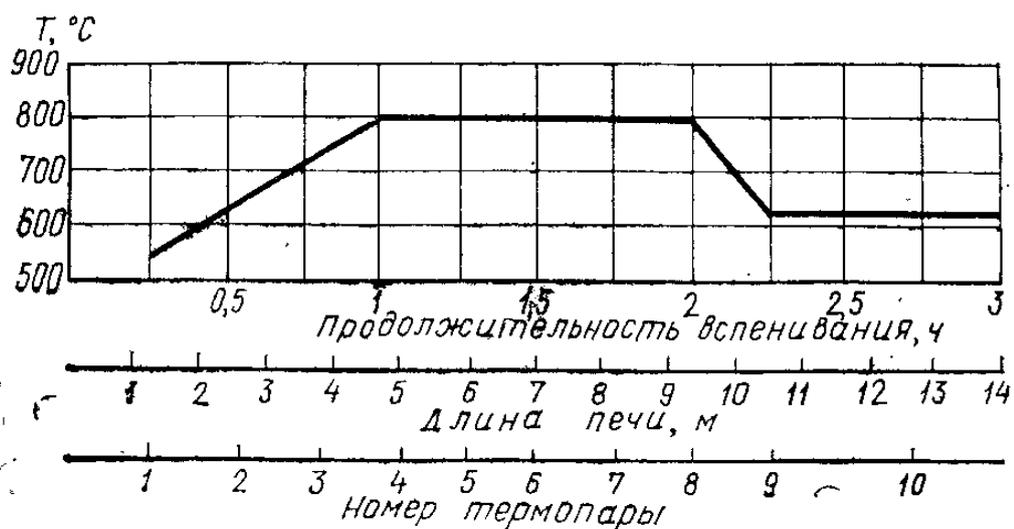


Рисунок 16 – Режим работы печи вспенивания пеностекла

На выходе из печи блоки со вспененной стекломассой извлекают из блок-форм и направляют на охлаждение в печи отжига (лер) конвейерного типа, в которой проходят охлаждаются в течении 10 - 12 ч, представленному на рисунке 17 [44].

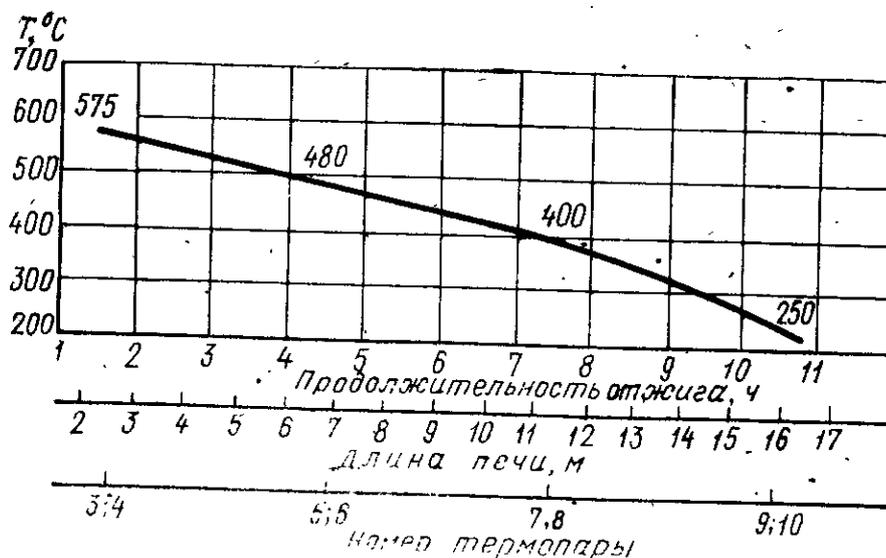


Рисунок 17 - Режим отжига пеностекла

Позиционирование готовых плит на сетчатый конвейер производят на ребро. Для достижения заданного режима отжига обеспечивают принудительную циркуляцию теплоносителя, что обеспечивается установкой вентиляционных систем.

В промышленности осваивается конвейерный способ производства блоков из ячеистого стекла рисунок 18 [44].

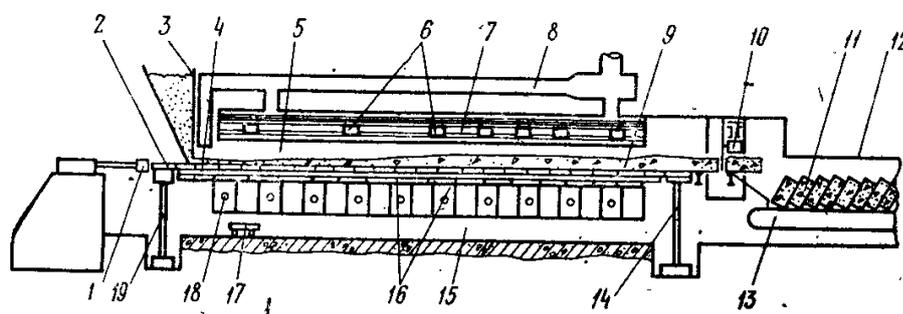


Рисунок 18 - Схема конвейерной установки

1-толкатель форм, 2-поддон, 3-бункер для шихты, 4-направляющие для поддона, 5-рабочий канал печи, 6-канал для отсоса дымовых газов, 7-верхний топочный канал, 8-коллектор для отсоса дымовых газов, 9-лента пеностекла, 10-отрезное устройство, 11-блоки пеностекла, 12-печь отжига, 13-конвейер печи отжига, 14-снижатель поддонов, 15-туннель для возврата поддонов, 16-шпалы из жаростойкой стали, 17-тележка, 18-горелка, 19-приемник поддонов.

В этом случае готовая композиция подается на конвейер, выполненный из жаростойких материалов в виде поддонов с боковыми стенками. Поддоны образуют желоб и соединены между собой встык. По мере продвижения желоба по печи, что обеспечивается специальным толкателем, композиция нагревается и, вспениваясь, образует ленту вспененного стекла, выравнивание верхней поверхности которой осуществляется валиками. На выходе из печи, после стабилизации пористой структуры (после охлаждения до 600°C), лента пеностекла дисковыми пилами разрезается на плиты заданных размеров (по размеру поддона), которые автоматически перегружаются в печь отжига. После окончания тепловой обработки плиты калибруются и направляются на склад готовой продукции.

Полученный опыт показал, что изделия получаемые двухстадийным способом получают более высокого качества. Этот процесс расходует меньшее количество жаростойкой стали, а так же легче подвергается автоматизации и оптимизации. Дальнейшее развитие промышленности, безусловно, должно быть направленно по пути проектирования высокопроизводительных автоматизированных линий. Одним из важнейших аспектов, удерживающих рост объема производства этого эффективного материала, является значительно повышенная стоимость компонентов для производства и его дефицитность. Потому поиск путей замены этого сырья дешевыми и недефицитными материалами, в том числе отходами и побочными продуктами других отраслей промышленности, является важной задачей.

Материалы на основе вспученного жидкого стекла относятся к группе высокопористых материалов, которые являются продуктом термического или химического вспенивания гидратированного растворимого стекла (гидратированных щелочных силикатов). Их можно разделить по следующим принципам: принципу вспучивания, природе структурообразующих элементов изделий, фракционному составу и эксплуатационным свойствам [48].

Различают вспененные жидкостекольные пеноматериалы, представляющие собой продукты вспучивания растворимых гидратированных стекол, и композиционные материалы, включающие гранулированное вспученное жидкое стекло в комплексе со связующим. По природе вспучивания жидкостекольные материалы

подразделяются на термовспученные и вспученные в результате химического взаимодействия между стеклом и специально введенным в него веществом [48].

Зернистые, а также обжиговые монолитные материалы относят к термовспученным материалам, а заливочные композиции, в которые вводят газообразующий компонент к вспученным химическим путем.

В зависимости от гранулометрического состава зернистые материалы подразделяют на крупнозернистый (стеклопор) с размером зерен от 5 мм и мелкозернистый (силипор) – 0,1 - 5мм.

Отношение к действию воды является основным различием эксплуатационных свойств материалов на основе жидкого стекла. Различают неводостойкие материалы, эксплуатация которых возможна при относительной влажности воздуха не более 75 °С, а так же материалы с повышенной водостойкостью, способные длительное время выдерживать действие воды.

Материалы с различными композициями, изготовленные на основе зернистых продуктов, в зависимости от их наполнения межзерновой пустотности связующими веществами делят на контактные и объемные омоноличивание. Сотопластовые материалы, состоящие из бумажного или тканевого сотопластового каркаса, пропитанного специальными растворами, заполненного мелкодисперсным зернистым материалом из вспененного жидкого стекла, например силипора, следует считать особой формой композиционных материалов [64].

К достоинствам таких материалов можно отнести малую энергоемкость и простоту технологии, высокие теплоизоляционные свойства силипора – 0,028 - 0,035 Вт/(м·°С), а стеклопора и изделий на его основе не превышает 0,065 Вт/(м·°С)], низкую кажущуюся плотность (от 10 - 60 кг/м³ для зернистых материалов, не более 200 кг/м³ для композиционных изделий), негорючесть[64].

Одним из основных недостатков, удерживающих развитие производства теплоизоляционных материалов на основе вспученного жидкого стекла, относятся высокая водопоглощение и дефицитность гидратированных силикатов.

Получение материалов с низким коэффициентом водопоглощения возможно (такие исследования выполнены в МИСИ им. В.В. Куйбышева), но это связано с

существенным удорожанием продукции, повышением средней плотности и теплопроводности материалов.

Следует осуществить дальнейший подбор более высокоэффективных путей понижения водопоглощения с целью расширения сфер использования таких продуктов.

На ряду с этим существует процесс получения пеноматериала в основе которой применяется жидкое стекло, такой процесс имеет три разновидности. Процесс производства материала в гранулах (стеклопора) включает следующие операции: приготовление композиции из жидкого стекла и добавок, не полная дегидратация полученной композиции; диспергирование (грануляция) смеси и вспенивание гранул [66].

Для производства таких материалов сырьем служат: стекло натриевое, тонкомолотые минеральные наполнители и добавки специального назначения. Тонкомолотые минеральные наполнители, в качестве которых можно с успешно использовать оксид алюминия, каолин, мел, известняк, , перлит, тальк, асбестовую пыль, маршалит, трепел, песок, золы ТЭС и многие другие отходы химических производств, призванных регулировать реологические характеристики смеси и повышения прочности готовых гранул.[44]

Для направленного регулирования эксплуатационных свойств материала предназначены специальные добавки. В зависимости от получаемого эффекта, при их введении, эти добавки можно разделить на гидрофобизирующие, упрочняющие, повышающие водостойкость и вспучиваемость материала.

В исходную жидкостекольную смесь входят 5 - 7% тонкодисперсного наполнителя с удельной поверхностью 2000 - 3000 см²/г, 93 - 95% жидкого стекла плотностью 1,4 - 1,45 г/см³ и 0,5 - 1,0% гидрофобизирующей добавки – кремнийорганической жидкости ГКЖ-943, ГКЖ-11 или ГКЖ-10.

Технологическая схема процесса получения стеклопора приведена на рисунок 19 [44].

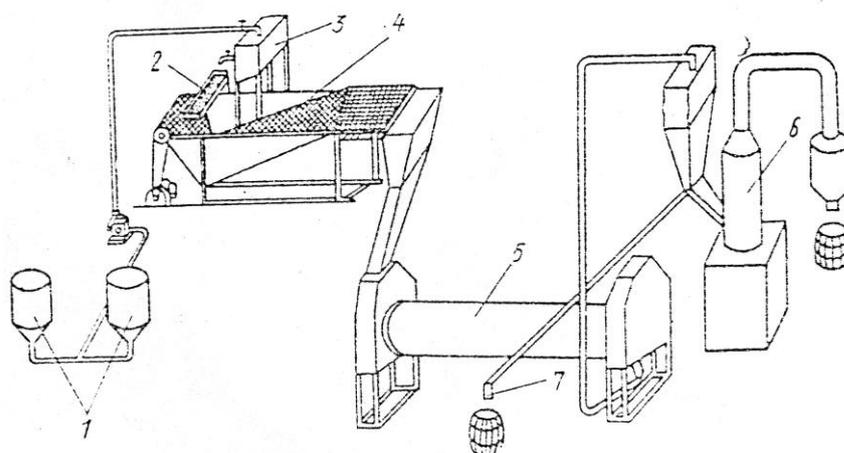


Рисунок 19 - Технологическая схема получения стеклопора

В двух смесителях вертикального типа 1 готовится смесь, после достижения однородности она перекачивается в расходный бак 3 гранулятора 4 и через фильтерную пластину 2 самотеком в виде капель поступает в ванну гранулятора, которая заполнена раствором хлорида кальция плотностью 1,29 - 1,35 г/см³. Капли попадая в раствор хлорида кальция, образуют гранулы (бисер) с упрочненным поверхностным слоем, представляющим собой кремнегель, содержащий адсорбированный оксид кальция.

Полученные гранулы оседают на сетку конвейера и выносятся ею в приемное устройство гранулятора, из которого непрерывным потоком попадают в сушильный барабан 5 через пересыпное устройство. Упрочнение верхнего слоя гранул в растворе хлорида кальция происходит во времени и зависит от температуры раствора. Оптимальным условием формирования гранул с прочным поверхностным слоем является пребывание их в течении 40 минут в растворе хлорида кальция, что обеспечивается заданной скоростью движения сетки конвейера, при температуре раствора 22 - 30 °С. Для поддержания в заданных пределах температуры раствора хлорида кальция ванну гранулятора оборудуют нагревателем – паровым змеевиком.

В сушильном барабане производится сушка гранул в течение 10 - 20 мин при температуре около 90 °С, до остаточной влажности 30% , далее гранулы поступают по трубопроводу к месту складирования 7 для отправки потребителю или в расходный бункер печи кипящего слоя 6 для вспучивания, которое проходит при температуре от 350 до 500 °С, в течение 1 - 3 мин. Полученный продукт поступает на дальнейшую переработку в изделия либо затаривается в полиэтиленовые мешки и отправляется потребителю.

В качестве агента тепловой обработки возможно применяют вращающуюся печь с аналогичными тепловой обработки.

При производстве силипора (с гранулами менее 5 мм) грануляция жидкостекольной смеси проводится путем ее распыления в башенной сушилке. В этом случае операции грануляции и вспучивания совмещаются в одной.

За счет испарения связанной воды содержащейся в жидком стекле в момент перехода материала в пиропластическое состояние происходит вспенивание гранул. Температура размягчения растворимого стекла тем ниже, чем больше воды в нем содержится [44],

Во всех используемых способах производства пеностекла давление газа в пузырьках при плавлении значительно выше атмосферного. Первоначально после охлаждения до температуры окружающей среды давление может быть немного ниже атмосферного, однако, по мере того как происходит образования проницаемых пор в стенках пузырьков давление газа внутри обычно сравнивается с атмосферным.

Коэффициент теплопроводности за счет переноса тепла газом между стенками пузырьков не зависит от давления, пока диаметр пузырьков больше длины свободного пробега молекул – около 50 нм при нормальных параметрах [1].

Основной причиной образования пор в стенках пузырьков является выбор технологии производства пеностекла, при которых образуются пузыри со слишком тонкими стенками (толщиной 1-10мкм) и применяются добавки, в процессе изготовления пеностекла встраивающиеся в состав стенок пузырьков.

Вопросы общего характера получения пеностекла описаны в монографиях [2,3]. Для его изготовления варят специальное стекло, дробят его, изготавливают композицию, состоящую из 95-97% из стекла и на 5-3% из газообразователей (углеродных, например, древесного угля, кокса, сажи или карбонатных, например, известняка). Готовую композицию нагревают до температуры 800-875 °С. При этой температуре зерна стекла спекаются, а образовавшиеся в результате разложения газообразователей газы вспенивают стекломассу с высокой вязкостью.

После стадий вспенивания и охлаждения получается пористый материал с высокими эксплуатационными свойствами.

В качестве исходного силикатного компонента возможно использование не только стекла, но и различных кремнийсодержащих пород: отходов перлита [6], перлит [4,5], вулканического стекла [7], стекла вулканического и трепела, диатомита [8,9], вулканического пепела и отходов добычи вулканического пепла [10], туфов вулканических [11], отходов щелочных алюмосиликатов [12], туфа [13,14], трепела [15], цеолитсодержащую породу [16,17], шлаков металлургических [18], диатомитов [19].

Сырьевая смесь для получения пеностекла может в небольших количествах содержать различные целевые добавки, которые в конечном итоге приводят к повышению прочности пеностекла.

К этим добавкам относятся следующие: CuO [20], NiO [21], ZnO [22], серноокислый металлосодержащий шлам [23], B_2O_3 и TiO_2 [24], ZrO_2 [25,26], CdO [27], стекловолокно [28], красный шлам, характеризующийся следующим химическим составом, масс. %: SiO_2 - 9,5-11,1; TiO_2 - 4,4-5,6; Al_2O_3 - 17,0-19,0 [29].

Повышение прочности ячеистого стекла, используемого для тепловой изоляции промышленного оборудования, трубопроводов достигается при следующем содержании компонентов, масс.% : газообразователь 0,08 - 0,12%, алюмощелочной шлам 6 - 8, кремнеземистая порода – остальное. Алюмощелочной шлам – это продукт щелочного травления алюминия, содержащий гидроксид алюминия и гидроксид натрия в равных долях [30].

С целью уменьшения теплопроводности пеностекла большой интерес представляет следующий состав, масс.% : перлит - 74,0 - 78,0; гидрат окиси натрия – 5,0 - 10,0; нитрат свинца – 0,5-1,0; азотная кислота – 1,5 - 2,0; древесные опилки – 11,05 - 13,0; мраморная крошка – 1,5 - 2,0 [31],

Вспенивание пеноматериала при использовании в качестве газового агента углеродных газообразователей обычно проводят при температурах 830 - 890°C. Процесс вспенивания при этих температурах в зависимости от состава стекла, конструкции печей и способа обогрева продолжается от 0,5 до 1,5 часов.

Так пеностекло с повышенной прочностью и с равномерной замкнутой структурой получают при использовании в качестве ГО технического углерода с высоким и/или средним показателем дисперсности, с зольностью не более 0,45%. Вспенивание осуществляют путем нагрева форм до температуры 840 - 880 °С за 48 - 52 мин с последующей изотермической выдержкой в течение 21 - 23 мин, причем температура у дна формы на 5 - 30 °С больше, чем в верхней части формы. Стабилизацию осуществляют при температуре 590 - 610 °С в течение 35 - 40 мин. Отжиг производят в печи отжига от 550-600 °С со скоростью охлаждения не более чем 0,75 - 0,85 град/мин до 29 - 31°C, продолжительность отжига не менее 14 ч. [32]

Из обзора патентной литературы известен ряд технических решений по значительному повышению качества блочного пеностекла, получаемого по технологии с применением углеродных газообразователей и стеклобоя [33,34,35].

С точки зрения улучшения теплоизоляционных характеристик очень интересным представляется способ получения пеностекла из порошка стекла, газообразователя – глицерина в количестве 0,5 - 2% и водного раствора силиката натрия.

Причем приготовление композиции совмещают с формированием гранул путем скатывания в смесителе – грануляторе. Затем гранулы термообработывают при 750 °С в течение 1 часа. В результате термообработки гранулы вспениваются, образуя однородный блок пеностекла плотностью 135 - 150 кг/м³ с коэффициентом теплопроводности 0,051 - 0,083 Вт/(м·°С), т.е. получается более экономиче-

ски выгодный строительный материал с более высокими потребительскими свойствами [36].

Как уже отмечалось ранее углеродным газообразователям уделяется большое внимание при получении пеностекла.

Использование карбонатных газообразователей, таких как известняк, доломит, мел, мрамор, а также различных отходов этих пород с содержанием (CaO+MgO) не менее 48-50% встречается реже.

Применение карбонатных газообразователей (мел, доломит или мрамор), позволяющих вести процесс при более низких температурах рассматривается в патентах [37,38]. В первом случае для снижения температуры вспенивания порошкообразующую смесь стекла, карбонатного газообразователя и химически активного вещества (0,8 - 5% масс. алюминиевой пудры) нагревают в металлической форме с раздвижными стенками и выталкиваемыми вкладышами в печи. Нагрев в печи до температуры вспенивания 680-740 °С ведут 0,8 - 1,5 часа. Затем блоки пеностекла помещают в печь отжига для постепенного охлаждения. Скорость снижения температуры в которой от 600 °С до 50 °С и составляет 1,2-1,6 °С/мин. Плотность получаемого пеностекла составляет 190 - 210 °С.

Те же авторы предлагают дополнительно вводить в смесь стекла и карбонатных газообразователей минеральное поверхностно активное вещество, например, каолин в количестве 3 - 5 масс.%, плотность блоков пеностекла равна 200 кг/м³.

Способ предусматривает использование специально разработанных форм, позволяющих получать плиты пеностекла с заданными геометрическими размерами и исключить из технологического процесса конечную механическую обработку блоков. Поверхность блока в случае такого производства имеет стеклованную поверхность, повышающую прочность пеностекла. Причем печь отжига аналогична печи вспенивания, за исключением того, что нагрев ее начальной части осуществляется только в период пуска производства. Нагрев части печи в стационарном режиме отключается, так как тепла, запасенного металлом форм и блока-

ми пеностекла, достаточно для поддержания необходимого температурного режима по всей длине печи отжига.

Пеностекло, имеющее равнопористую структуру с размером округлых и полиэдрических пор 1,5 - 3,5 мм и плотностью 180 - 300 кг/м³, получают из шихты, включающей стекло, углеродистый газообразователь и вспенивающую стабилизирующую добавку в виде нитратов натрия или калия в количестве 1,0 - 1,5 масс.% [39].

Процесс поризации пеностекольных масс, содержащих молотое стекло и углеродистый газообразователь, предопределяется видом и количеством вводимого газообразователя и окислительным потенциалом шихты. При недостатке кислорода в шихте процесс ее поризации протекает в вялотекущем режиме, а получаемое пеностекло имеет небольшую пористость с размером пор 0,5 - 1 мм. Для интенсификации процесса, в ряде случаев, прибегают к увеличению температуры вспенивания до 850 - 900 °С, либо проводят дополнительную операцию гидроксиглирования шихты.

Повышение температуры вспенивания приводит к существенному снижению вязкости стекла, и формирование оптимальной пористой структуры становится проблематичным.

Введение в состав шихты нитратов натрия или калия способствует интенсификации и оптимизации процесса вспенивания за счет плавления и разложения этих солей с выделением кислорода при сравнительно небольших температурах, что позволяет достигать необходимого уровня поризации шихты при температуре 800±10 °С.

Известен способ [40] получения пильного пеностекла из смешиваемых в мельнице измельченных стекла и газообразователя CaCO₃ или CaSO₄ заданного дисперсионного состава. Заполняют формы, из смеси вытесняют воздух продуванием ее газами SO_x и/или CO_x и далее нагревают до температуры вспенивания, затем стабилизируют и отжигают.

Предложен способ [41], по которому пеностекло делают по средствам продувки газа через расплав стекломассы с растворением газа в стекле, введением в

стекло веществ, способных образовывать в расплаве зародыши пузырьков газа и веществ, вызывающих кристаллизацию стекла; расплав охлаждают таким образом, чтобы образовавшиеся при выдавливании газа из образовавшихся кристаллов пузырьки сохранить в остывшем стекле.

Существует производство пеностекла путем многоструйного пропускания воздуха или других газов через толщу стекломассы [42]. Этот способ был взят за основу при изготовлении пеностекла или пеномасс с сохраняющимися на протяжении многих лет нужными значениями коэффициента теплопроводности, звукопроницаемости и хорошей светопропускаемостью. Суть способа заключается в том, что плавят стекло или пластмассу с добавками высоко гигроскопических веществ, таких, как безводные CaO, BaO и Al₂O₃. Затем его остужают до 950 -1200 °С и вспенивают в сосуде при многоструйном пропускании перегретого пара той же температуры. Пузыри в расплаве размельчают механическими способами до диаметра 1 - 5 мм с толщиной их стенок от 0,05 мм до 1 мм и пенистую массу выдавливают в формы, покрытые изнутри веществами, препятствующими прилипанию вспенивающегося материала к стенкам формы и отжигают путем плавного охлаждения в муфельном шкафу [43].

1.5. Задачи исследования

Исходя из анализа состояния исследований в области процессов и технологий получения пеностекла, разработанных составляющих частей композиций и их соотношений, используемых типов и количества газообразователей, модифицирующих добавок, а так же трудностей, связанных со свойствами полученного материала:

- разработка двух компонентной системы газообразователя, подбор его оптимальное соотношения
- Исследование различных факторов, влияющих на процесс получения и свойства конечного материала
- Разработка технологии получения пеностекла в непрерывном потоке

- Получение пеностекла с плотностью от 80 до 150 кг/м³, без содержания сероводорода, с сохранением высокой физических и механических показателей.
- Изучение свойств полученного вспененного материала

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании литературных данных для решения поставленных задач были определены объекты и методы исследований, содержание которых раскрываются ниже.

2.1. Объекты исследований

При разработке композиции для получения пеностекла на газообразователях карбонатного типа и модифицирующей добавки композиции использовались следующие компоненты: жидкое стекло, каолин, карбонат кальция (мрамор), азотистокислый натрий.

В выборе компонентов газообразователя были учтены требуемые свойства материала (начало работы газообразователя при более низких температурах, получение бессернистого материала с плотностью от 80 кг/м³)

В качестве объектов исследования при создании композиции газообразователей, были выбраны карбонат кальция (CaCO₃) - мрамор и натриевая соль азотной кислоты (NaNO₃).

Основные характеристики газообразователя карбоната кальция (CaCO₃):

Натриевая соль азотной кислоты (NaNO₃) - бесцветные кристаллы, плотность 2,25 г/см³, T_{пл} - 308 °С, выше температуры плавления разлагается, T_{разл} - 380 °С.

$\text{NaNO}_3 \longrightarrow \text{NaNO}_2 + \text{O}_2$, растворим в воде T - 80°С, температура спекания – 720 °С.

Мрамор - метаморфическая горная порода, состоящая только из кальцита CaCO₃. Температура спекания, °С 760 - 775, плотность - 2,3 - 2,6 г/см³

Выбор газообразователей NaNO₃ и CaCO₃ обусловлен тем, что при их сочетании получаемые материалы имеют частично сообщающиеся поры, материал получаемый на их основе не содержит в ячейках сероводорода.

В качестве модифицирующей добавки был использован каолин. При нагревании до 550 - 600° теряет воду и превращается в метакаолин (аморфный силикат алюминия). При введении метакаолина до 4% в композицию улучшается консистенция раствора, увеличивается пластичность, повышается прочность готового вспененного материала.

2.2 Методы исследований

2.2.1. Определение водопоглощения

Исследование коэффициента водопоглощения образцов пеноматериала осуществляют согласно ГОСТ 15588-86. Суть методики состоит в определении массы воды, поглощенной образцом сухого материала после полного погружения их в воду и выдерживания в ней в течении заданного времени.

Для проведения испытания выпиливают образцы размером 50x50x50 мм, очищают от пыли и опила, снимают размеры и взвешивают. Полученные результаты записывают в журнал проведения экспериментов.

Образцы погружают в емкость с водой таким образом, чтобы уровень воды в емкости был выше верхнего уровня погруженных образцов не менее 50 мм.

Образцы вынимают через 24 часа, промокают фильтровальной бумагой и взвешивают на настольных лабораторных весах с погрешностью не более 0,01гр. Полученные результаты отрабатываются по формулам:

Водопоглощение по массе определяют по формуле:

$$W_m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100\% , \quad (7)$$

где m_1 - масса образца до выдержки в емкости с водой, m_2 – масса образца после выдержки в емкости с водой.

Водопоглощение по объему вычисляют по формуле:

$$W_o = \frac{m_1 - m_2}{V} * 100\% , \quad (8)$$

где m_1 - масса образца до выдержки в емкости с водой, m_2 – масса образца после выдержки в емкости с водой, V – объем образца

$$V = a \cdot b \cdot h, \quad (9)$$

Результаты эксперимента заносятся в таблицу.

2.2.2. Определение прочности при сжатии

Исследование предела прочности при сжатии осуществляют на основании ГОСТ 15588-86. Суть метода заключается в определении величины сжимающего усилия, вызывающего 100% деформацию при заданных условиях испытания.

Из изделия изготавливают образец в форме куба с размером ребра (50 ± 1) мм, если в нормативном документе не указаны другие размеры.

Прочность при сжатии определялась на разрывной машине, на кафедре «Сопротивления материалов» ВлГУ, которая работает на сжатие. Линейное перемещение фиксировалось с помощью механического индикатора. Испытательная машина обеспечивает измерение нагрузки с погрешностью, не более 1% от величины усилия, со скоростью нагружения образца 10 мм/мин. Длину и ширину верхнего и нижнего основания образца измеряют штангенциркулем по двум параллельным ребрам. Предел допускаемой погрешности измерения $\pm 0,1$ мм.

Длиной и шириной образца считают среднее арифметическое значение четырех измерений длины и ширины верхнего и нижнего оснований.

Образец устанавливают в машину так, чтобы сжимающее усилие было направлено по вертикальной оси образца.

Разрушающей считают наибольшую нагрузку, отмеченную при испытании образца в момент его разрушения. Полученные результаты обрабатывают по формуле.

Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ в мегапаскалях ($\text{кгс}/\text{см}^2$) рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{lb} \quad (10)$$

где, P - разрушающая нагрузка, Н (кгс), l - длина образца, мм (см), b - ширина образца, мм (см).

За результат испытания принимали значения округленные до 0,01 МПа.

2.2.3. Определение кислотности образцов

pH – единица измерения кислотности или щёлочности растворов, выражается как отрицательный логарифм концентрации ионов водорода:

$$\text{pH} = - \log[\text{H}^+] \quad (11)$$

pH 0 равняется крайней кислотности, pH 14 – равняется крайней щёлочности, а pH 7 – нейтральной среде.

Для измерения показателя pH необходимо два электрода: измерительный электрод и электрод сравнения. Обычно используется комбинированный электрод (измерительный электрод и электрод сравнения в одном функциональном блоке).

Измерительный электрод (pH-электрод или сенсорный элемент в комбинированном электроде) содержится в буферном растворе с постоянной величиной pH; на нем, при погружении в измеряемый раствор, развивается потенциал (разница между ионными зарядами внешнего и внутреннего раствора). Это объясняется активностью (концентрацией) ионов H^+ в измеряемом растворе. Электрод сравнения (или эталонный элемент в комбинированном электроде) обладает постоянным, не зависящим от концентрации H^+ потенциалом pH-150МИ переводит результирующее напряжение между электродами в показание pH.

Для определения pH были отобраны пять образцов пеностекла. Образцы истирались до мелкой фракции. $5 \pm 0,1$ гр. смешивались с 200 мл дистиллированной воды, полученный раствор отфильтровывался. Измерительный электрод и электрод сравнения погружали в отфильтрованный раствор. Температура проведения экспериментов 20°C . Было проведено 5 последовательных экспериментов. Результаты с дисплея pH-метра фиксировались в таблицу. Для определения pH использовался pH-метр pH-150МИ представленного на рисунке 20.

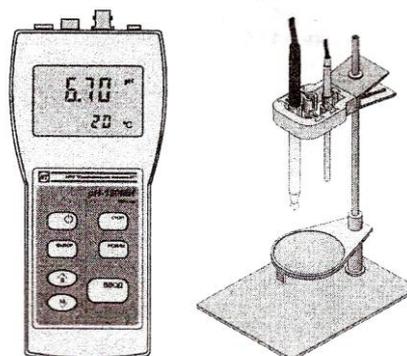


Рисунок 20 - pH-метр pH-150МИ

Технические характеристики pH-метра pH-150МИ представлены в таблице 5.

Таблица 5. Технические характеристики pH-метра pH-150МИ

Диапазон измерения	pH - 0,00 - 14,00 (в комплекте с электродами) mV от -2000 до 2000 температура от -10 до +100,0 °C
Дискретность	pH - 0,01 mV - 1 температура - 1 °C
Основная погрешность преобразователя	pH $\pm 0,02$ mV ± 3 температура ± 2 °C
Основная погрешность прибора (в комплекте с электродами)	pH $\pm 0,05$ температура ± 2 °C
Температурная компенсация	Ручная и автоматическая 10 - 100°C
Дисплей	символьный ЖКИ дисплей.

2.2.4. Определение сорбционной влажности

Сущность метода заключается в измерении массы воды, адсорбированной образцом сухого материала при определенных условиях в течение заданного времени.

Сорбционную влажность органических ячеистых изделий определяют на образцах размерами $50 \times 50 \times 50 \pm 1$ мм, не имеющих уплотненного верхнего слоя, для изделий номинальной толщиной более 50 мм и размером

$40 \times 40 \times 40 \pm 1$ мм - для изделий номинальной толщиной 50 мм, если в нормативных документах на изделия конкретного вида не указаны другие

размеры. Образцы высушивают и охлаждают в эксикаторе над хлористым кальцием. Образцы органических ячеистых материалов после высушивания взвешивают, помещают над водой в эксикатор и выдерживают 24 ч при температуре $(22\pm 5)^\circ\text{C}$, после чего снова взвешивают.

Коэффициент сорбционной влажности органических ячеистых материалов вычисляют по формуле:

$$W_{\text{сорб}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \quad (12)$$

где, m_1 - масса образца после выдерживания над поверхностью водой, гр,

m_2 - масса высушенного образца, гр.

За результат испытания принимали значения округленные до 0,1%.

2.2.5. Определение паропроницаемости

Сопrotивление паропроницанию изделия – величина, численно равная разности парциального давления водяного пара в паскалях у противоположных сторон изделия с плоскопараллельными сторонами, при которой через площадь изделия, равную 1 м^2 , за 1 ч проходит 1 мг водяного пара при равенстве температуры воздуха у противоположных сторон слоя.

Паропроницаемость материала – величина, численно равная количеству водяного пара в миллиграммах, которое проходит за 1 час через слой материала площадью 1 м^2 и толщиной 1 м при условии, что температура воздуха у противоположных сторон слоя одинакова, а разность парциального давления водяного пара равняется 1 Па.

Сущность метода определения паропроницаемости заключается в создании стационарного потока паров воды через исследуемый образец и определении величины этого потока. Испытание проводят на трех образцах размерами $100 \times 100 \times 30$ мм, выпиленных из средней части изделия. Боковые поверхности образцов изолируют пластилином, в стеклянную чашку наливают 120 ± 5 мл дистиллированной воды. На чашку укрепляют образец испытываемого материала при помощи пластилина рисунок 21.

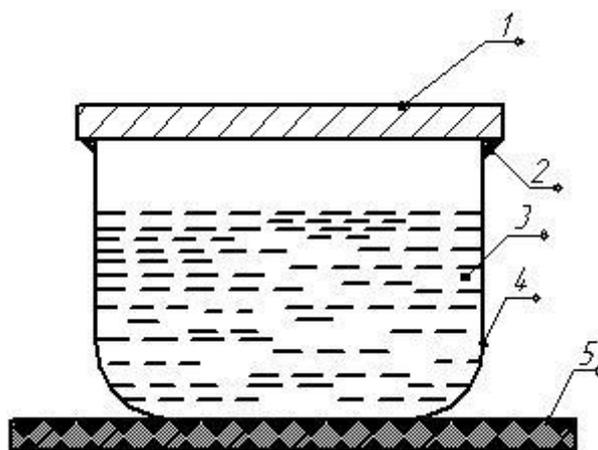


Рисунок 21 - Схема прибора для определения паропроницаемости
 1-Образец материала, 2- пластилин, 3-дистиллированная вода
 4-стеклянная чашка, 5-полка.

Три образца испытуемого материала, укрепленные на стеклянных чашках помещают в термостатированный шкаф. Для создания в шкафу относительной влажности воздуха 54,5% в него помещают чашки с насыщенным водным раствором шестиводного азотнокислого магния. Также в шкафу помещают термометр и психрометр для контроля за температурой и относительной влажностью воздуха. Через каждые 3 суток после начала испытания стеклянные чашки с укрепленными над ними образцами взвешивают.

Под результатом взвешивания вычисляют величину плотности потока водяного пара через образец q в $\text{мг/ч}\cdot\text{м}^2$ по формуле:

$$Q = \Delta m / \Delta T f, \quad (13)$$

где, Δm – уменьшение массы чашки с водой за время Δt , мг, Δt – время между двумя последовательными взвешиваниями, ч, F – площадь образца, м^2 .

Испытание считают законченным, если значение плотности потока водяного пара через образец, вычисленные по результатам трех последовательных взвешиваний, остаются без изменения или начинают увеличиваться. За плотность потока принимают наименьшее значение из результатов трех последовательных взвешиваний.

Соппротивление паропроницанию материала R в $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ вычисляют по формуле:

$$R = ((P_1 - P_2) / q) - (\delta v / \mu v), \quad (14)$$

где, P_1 – парциальное давление насыщенных паров воды при температуре испытания, Па, δv - толщина воздушного слоя, равная расстоянию от уровня воды в стеклянной чашке до нижней грани образца при последнем взвешивании, μv – паропроницаемость воздуха, равная $1,01 \text{ мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, P_2 – парциальное давление паров воды над образцом, Па.

Величину P_2 вычисляют по формуле:

$$P_2 = \varphi \cdot P_1 / 100\%, \quad (15)$$

где, φ – среднее значение относительной влажности воздуха в шкафу с образцами за последние 3 суток испытания, %.

Паропроницаемость материала каждого образца μ в $\text{мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ вычисляют по формуле:

$$\mu = \delta / R, \quad (16)$$

где, δ - толщина образца, м.

Паропроницаемость испытываемого материала вычисляют как среднее арифметическое значение результатов измерения паропроницаемости трех образцов материала.

2.2.6. Определение размера частиц лазерной дифракцией

Лазерный дифракционный анализатор размера частиц «ANALYSETTE 22 NanoTec plus» (рис. 22) является прибором универсального применения для определения распределения частиц по размерам в суспензиях от 0,01 до 2000 мкм, эмульсиях и порошках с помощью лазерной дифракции. Лазерная дифракция обладает рядом важных преимуществ перед “классическими” методами измерения, такими как рассев, седиментация или анализ по изображению: краткое время про-

ведения анализа, хорошая воспроизводимость и точность, простая калибровка, большой диапазон измерений и большая гибкость.



Рисунок 22 - Лазерный дифракционный анализатор ANALYSETTE 22 NanoTec plus

Сущность метода заключается в определении распределения частиц по размерам посредством лазерной дифракции используя физический принцип рассеяния электромагнитных волн. Частицы в параллельном лазерном луче рассеивают свет на постоянный телесный угол, величина которого зависит от диаметра частиц. Линза собирает рассеянный свет кольцеобразно на детекторе, который установлен в фокальной плоскости линзы. Не рассеянный свет всегда сходится в фокальной точке на оптической оси.

С помощью комплексной математики из распределения интенсивности рассеянного света можно рассчитать распределение частиц по размерам в коллективе рассеивающихся частиц. В результате получают диаметр частицы лазерной дифракции, диаметр которой эквивалентен шару с одинаковым распределением рассеянного света. Измеряются средние объемные диаметры и получающееся распределение частиц по размерам является распределением по объему. Прибор имеет модульную конструкцию, состоит из компактного измерительного блока и блока диспергирования для измерения в жидкой среде.

2.2.7. Дифференциально-сканирующая калориметрия

Прибор синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter® фирмы NETZSCH (Германия) (рис. 23) предназначен для СТА (синхронный термический анализ), сочетает методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии в одном измерении. С помощью СТА проводятся измерения потоков теплоты и измерения массы при полностью идентичных условиях. Встроенный контроллер управления потоком газов для двух газов продувки и одного защитного газа.



Рисунок 23 - Прибор синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter

Технические характеристики прибора представлены в таблице 6.

Таблица 6. Технические характеристики прибора STA 449 F1 Jupiter

Температурный диапазон измерения	-150°C ... 2400°C
Скорости нагрева и охлаждения пробы - высокоскоростная печь - вольфрамовая печь	0.001 К/мин - 50 К/мин от 20 до 1250°C от 20 до 2400°C
Диапазон взвешивания	5000 мг
Разрешение ТГ	0,025 мкг
Разрешение ДСК	< 1 мкВт (в зависимости от сенсора)
Атмосферы	инертная, окисляющая, восстанавливающая, статическая, динамическая, вакуум
Прободержатели	TG-DSC, TG-DSC-ср, TG-DTA
Вакуум	Высокий вакуум до 10 ⁻⁴ мбар (10 ⁻² Па)

2.2.8. Определение общей пористости материала

Удельную поверхность определяли методом адсорбции газов на приборе «Sorbi-MS» (рис. 24), принцип действия которого основан на сравнении объемов газа-адсорбата, сорбируемого исследуемым образцом и стандартным образцом материала с известной удельной поверхностью. В качестве газа-адсорбата использовался азот. Измерение удельной поверхности проводили по 4-х точечному методу БЭТ. Так же с помощью данного прибора можно определить и распределение нанопор по размеру и измерить занимаемый ими объем внутри дисперсных и пористых материалов. Измерение производится при низких температурах, создаваемых при помощи жидкого азота, на смеси двух газов, состоящих из газа-носителя, в роли которого выступает газообразный гелий, ТУ 0271-001-45905715-02 (марка 6.0, объемная доля не менее 99,9999 %), и газа-адсорбата, в роли которого используют азот газообразный ГОСТ 9293-74 (особой чистоты, объемная доля не менее 99,999 %).

Прибор «Sorbi-MS» измеряет полную удельную поверхность, внешнюю удельную поверхность, средний размер наночастиц; объём мезопор, объём микропор, полный объём пор, распределение пор по размерам путем построения изотерм адсорбции и десорбции в диапазоне парциальных давлений 0,06–0,95 P/P₀. Для работы с прибором используется специализированное программное обеспечение SoftSorbi-II. Градуировка прибора производится по государственным стандартным образцам удельной поверхности и по заданному объему газа. Технические характеристики прибора представлены в таблице 7.

Таблица 7. Технические характеристики прибора «Sorbi-MS»

Диапазон измерений удельной поверхности	0,01–2000 м ² /г
Диапазон парциальных давлений	0,06–0,95 P/P ₀
Предел допускаемой относительной погрешности измерений удельной поверхности	± 6%
Диапазон измерения объема пор	от 0,005 см ³ /г
Время установления рабочего режима	40 мин
Газ-адсорбат	N ₂
Газ-носитель	He

Таблица 7. Технические характеристики прибора «Sorbi-MS»

Рабочий объем ампулы	1 см ³
Температура окружающей среды	5–40 °С
Размеры (ДхШхВ)	310 x 285 x 380
Относительная влажность воздуха, не более	75%
Напряжение	~ 220 ± 10% В
Вес нетто	12 кг

Станция подготовки образцов «SORBIPREP» предназначена для дегазации образцов дисперсных и пористых материалов перед проведением измерений. Процесс дегазации заключается в контролируемом нагреве исследуемого образца в потоке инертного газа в течение заданного времени.

Станция SORBIPREP® содержит три независимых порта для проведения дегазации образцов.

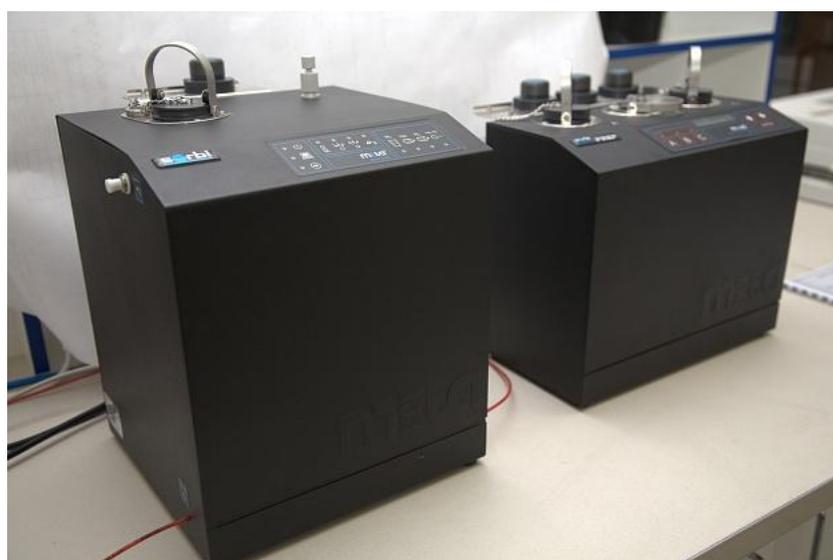


Рисунок 24 - Прибор «Sorbi-MS» для определения удельной поверхности и станция подготовки образцов «SORBIPREP»

Дегазация образцов производится в диапазоне температур 50–400 °С. Информация о текущих параметрах (температура, время) работы каждого порта выводится на жидкокристаллический индикатор встроенного пульта управления. Технические характеристики станции подготовки образцов «SORBIPREP®» представлены в таблице 8.

Таблица 8. Технические характеристики станции подготовки образцов «SORBIPREP»

Температурный диапазон дегазации образцов	50–400 °С
Шаг программируемого задания температуры дегазации	1 °С
Точность поддержания температуры дегазации	±0,2 °С
Время установления рабочего режима	5 мин.
Диапазон устанавливаемого времени дегазации	1–99 мин.
Расход инертного газа на один порт дегазации	не более 30 см ³ /мин
Размеры	214 x 320 x 332 мм
Вес нетто	6,5 кг
Напряжение	~ 220 ± 10% В

2.2.9. Определение теплопроводности

Эффективная теплопроводность λ_{eff} материала (соответствует термину «коэффициент теплопроводности», принятому в действующих нормах по строительной теплотехнике) — отношение толщины испытываемого образца материала d к его термическому сопротивлению R .

Испытания на определения теплопроводности строительных материалов проводят по ГОСТ 7076-99.

Сущность метода заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым (наибольшим) граням образца, измерении плотности этого теплового потока, температуры противоположных лицевых граней и толщины образца.



Рисунок 25 - Прибор для определения теплопроводности ИТС-1.

Для проведения испытаний подготавливают образцы, требования к которым соответствуют ГОСТ 7076-99, в виде прямоугольного параллелепипеда, наибольшие (лицевые) грани которого имеют форму квадрата со стороной, равной стороне рабочих поверхностей плит прибора ИТС-1 (рис. 25).

Толщина испытываемого образца должна быть меньше длины ребра лицевой грани или диаметра не менее чем в пять раз. Технические характеристики прибора представлены в таблице 9.

Таблица 9. Технические характеристики прибора ИТС-1.

Диапазон определения теплопроводности, Вт/м·К	0,02 - 1,5
Диапазон определения термического сопротивления, м ² ·К/Вт	0,01 - 1,5
Пределы погрешности измерения, %	±5
Размеры испытываемого образца, мм	150x150x25
Время измерения, час	0,5 - 2,5
Питание прибора	220 В / 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	120
Габаритные размеры прибора, мм	290x190x135
Масса, кг	6,5

Испытания должны проводиться на предварительно градуированном приборе. Подлежащий испытанию образец помещают в прибор. Расположение образца — горизонтальное или вертикальное. При горизонтальном расположении образца направление теплового потока сверху вниз.

В процессе испытания разность температур лицевых граней образца ΔT_u должна составлять 10-30 К. Средняя температура образца при испытании должна быть указана в нормативном документе на конкретный вид материала или изделия. Устанавливают заданные значения температур рабочих поверхностей плит прибора и последовательно через каждые 300 секунд проводят измерения:

сигналов тепломера e_u и датчиков температур лицевых граней образца, если плотность теплового потока через испытываемый образец измеряют при помощи тепломера;

мощности, подаваемой на нагреватель зоны измерения горячей плиты прибора, и сигналов датчиков температур лицевых граней образца, если плотность теплового потока через испытываемый образец определяют путем измерения электрической мощности, подаваемой на нагреватель зоны измерения горячей плиты прибора. Тепловой поток через испытываемый образец считают установившимся (стационарным), если значения термического сопротивления образца, вычисленные по результатам пяти последовательных измерений сигналов датчиков температур и плотности теплового потока, отличаются друг от друга менее чем на 1 %, при этом эти величины не возрастают и не убывают монотонно. После достижения стационарного теплового режима измеряют толщину помещенного в прибор образца d_u штангенциркулем с погрешностью не более 0,5 %. После окончания испытания определяют массу образца M_3 .

2.2.10. Определение кинетики разложения газообразователей

Сущность метода заключается в изучении кинетики разложения газообразователя и его комбинаций, определении характера выделения газообразователя при высоких температурах и объема выделившегося газа.

Целью проведения данного изучения является подбор оптимально подходящего газообразователя для получения неорганического пеноматериала с низкой кажущейся плотностью и мелкоячеистой структурой.

Применение углерода традиционно используемого в качестве газообразователя в настоящее время, позволяет получить пеноматериал с плотностью от 200 кг/м³, с присутствием в ячейках материала газа сероводорода, что значительно ограничивает его применение в гражданском строительстве.

Для изучения кинетики разложения в качестве газообразователей были взяты такие соединения как CaCO₃ и NaNO₃, и их различные соотношения в количестве 5 гр.

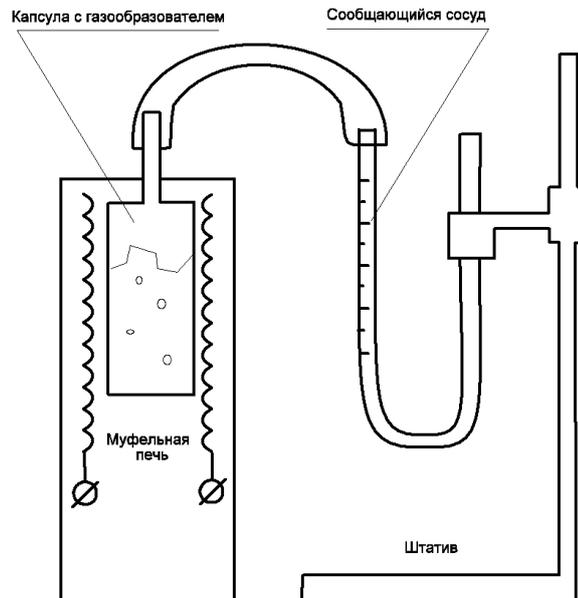


Рисунок 26 - Установка для определения объема выделившегося газа

Порядок проведения испытания следующий: образцы поочередно загружались в герметичную капсулу из нержавеющей стали помещенную в муфельную печь, в которой осуществлялся нагрев до заданной температуре с шагом поднятия температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в минуту. К капсуле прикреплялся сообщающийся сосуд для определения объема вытесненной воды, рисунок 26.

Разложение проб различных газообразователей проводили при температурах $600 - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ГАЗООБРАЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Одним из основных условий получения качественного пеностекла с низкой кажущейся плотностью и теплопроводностью, при сохранении механической прочности, является получение материала с мелкоячеистой равномерной структурой, это возможно лишь в том случае если появляется возможность управления процессом вспенивания в частности возможность регулирования температуры вспенивания, подбором газообразователя и его количества.

Известно[101], что получение пеноматериала с минимальной кажущейся плотностью возможно лишь при соответствии температур разложения газообразователя и температур размягчения исходного вещества, что можно осуществить как подбором соответствующего газообразователя, так и изменением температуры размягчения исходного стекла.

Исходя из данных литературного обзора, в качестве основного газообразующего компонента был выбран CaCO_3 , а в качестве дополнительного газообразователя - NaNO_3 , который, как известно, может изменить кристаллическую структуру стекла, тем самым изменить температуру размягчения последнего.

Применяя метод ДСК (рис. 27), было установлено, что температура размягчения карбоната кальция и нитрата натрия составляют $648,3\text{ }^\circ\text{C}$ и $307,6\text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. В тоже время температура размягчения стекла $588,2\text{ }^\circ\text{C}$, то есть расхождение температур размягчения стекла и температур разложения газообразователей весьма значительна. Этим на наш взгляд можно объяснить высокую кажущуюся плотность пеностекла при использовании в качестве газообразователя отдельных веществ. При использовании NaNO_3 в качестве газообразователя его разложение происходит значительно раньше размягчения стекла, что приводит к потере газа который не может удержаться в не размягченном стекле и плотность материала составляет 250 кг/м^3 .

В случае использования в качестве газообразователя CaCO_3 наоборот разложение газообразователя происходит значительно позднее температуры размягчения стекла. Вязкость последнего в этом случае уже недостаточна для того что-

бы удерживать в расплаве образовавшийся газ и как следствие кажущаяся плотность образцов составляет 400 кг/м^3 .

Как видно из рисунка, при введении в систему NaNO_3 кривая температуры размягчения исходной стекломассы сместилась и составила $644,9 \text{ }^\circ\text{C}$, что очень близко к температуре разложения основного газообразователя.

При введении в систему обоих газообразователей уже не удалось разделить эндотермические пики разложения CaCO_3 и размягчения стекла, что позволило получить пеноматериал с минимальной кажущейся плотностью.

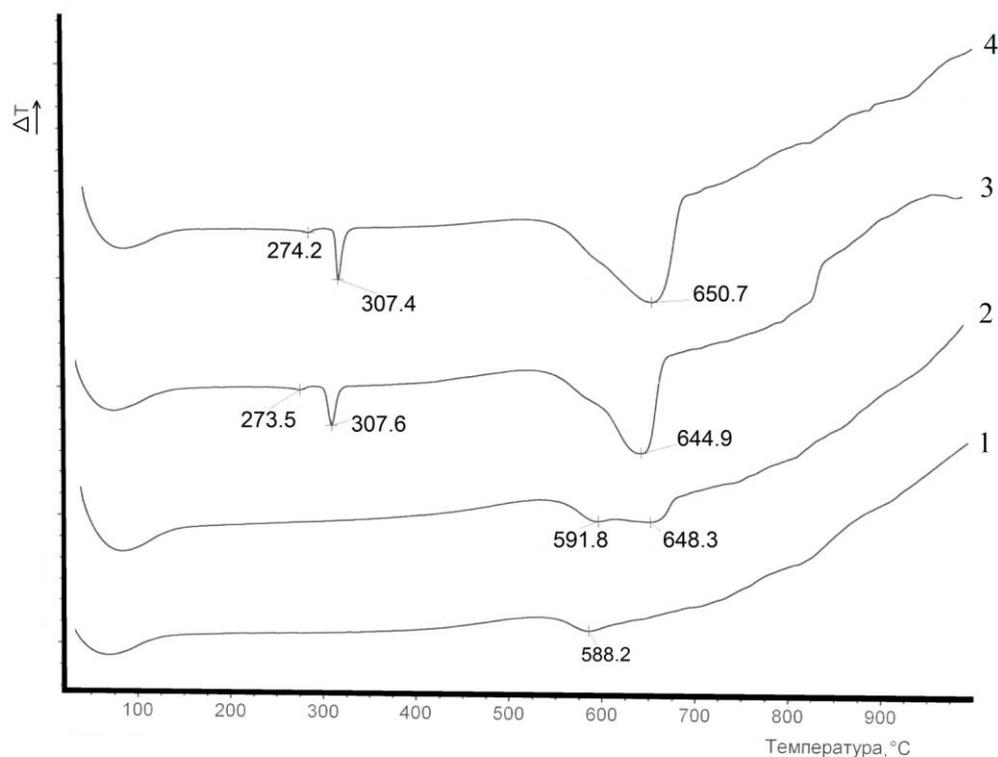
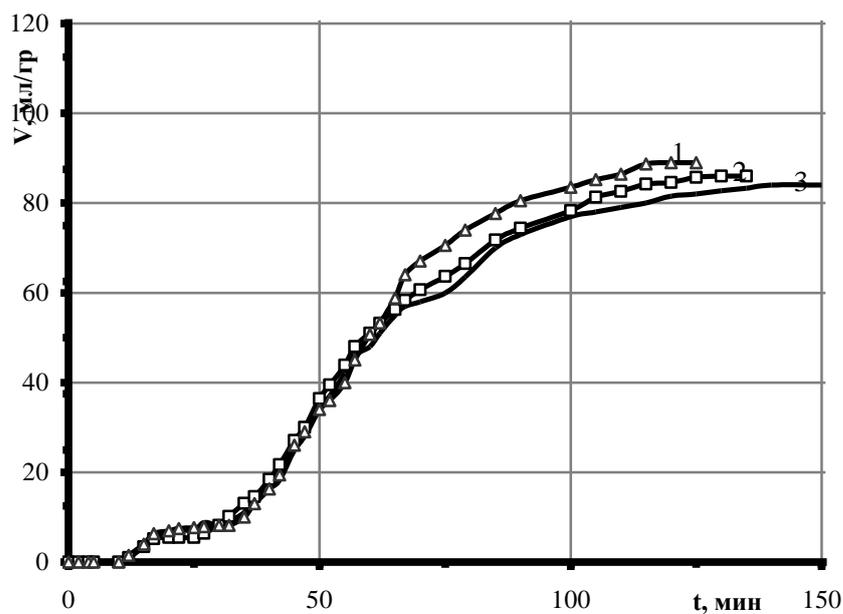


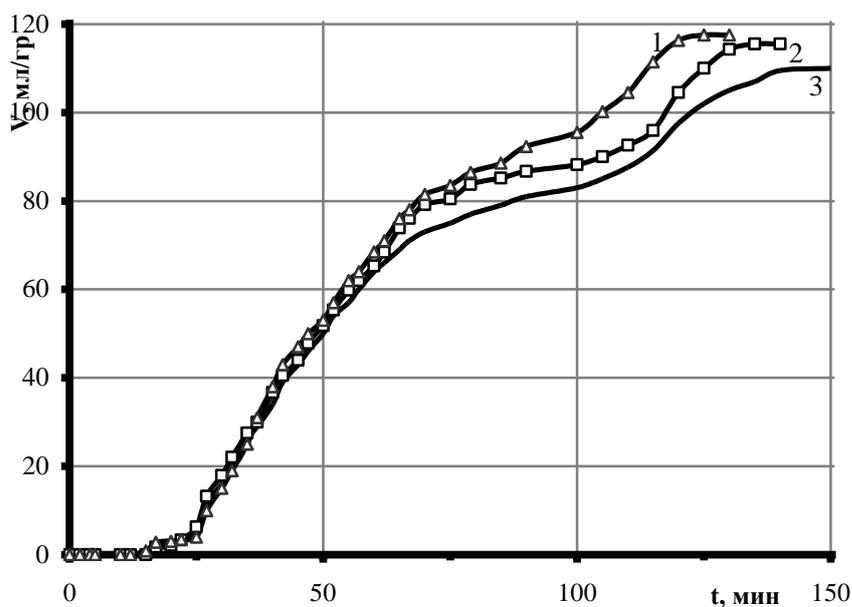
Рисунок 27 - Дифференциально-сканирующая калориметрия стекла (1), стекла+ CaCO_3 (2), стекла+ NaNO_3 (3), стекла+ NaNO_3 + CaCO_3 (4)

Для формирования структуры пеностекла важную роль в процессе вспенивания играет процесс разложения газообразователя, а именно объем выделившегося газа и кинетика газовыделения.

Так на рисунке 28 (а,б) представлена кинетика разложения исследуемых газообразователей NaNO_3 и CaCO_3 при различных температурах.



а)



б)

Рисунок 28 - Кинетика разложение NaNO_3 (а) и CaCO_3 (б) при температурах: 600 °C (1); 650 °C (2); 700 °C (3)

Как видно на рисунке, разложение NaNO_3 и CaCO_3 , как отдельных компонентов происходит не равномерно во всем исследуемом температурном интервале. При разложении отдельных компонентов на 20-25 минуте наблюдается интенсивное выделение газа, что, как будет показано в дальнейшем, приводит к получению изделия с неравномерной структурой с образованием раковин.

На рисунке 29 представлена кинетика разложения газообразующей системы ($\text{CaCO}_3 + \text{NaNO}_3$) при различных температурах и соотношениях, а в таблице 10 представленное газовое число при этих же температурах и соотношениях компонентов.

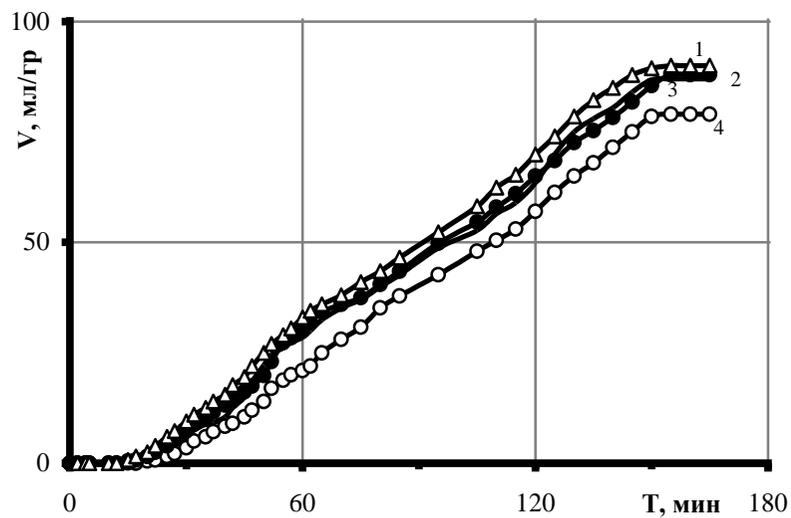
Таблица 10. Объем выделившегося газа в зависимости от соотношения компонентов газообразователя при различных температурах

Соотношение $\text{NaNO}_3 : \text{CaCO}_3$	$T_{\text{разложения}}, ^\circ\text{C}$	V, мл/гр
1 : 0,2	600	79
	650	86
	700	89
1 : 0,37	600	87
	650	93
	700	96
1 : 0,6	600	88
	650	94
	700	97
1 : 0,8	600	90
	650	96
	700	101

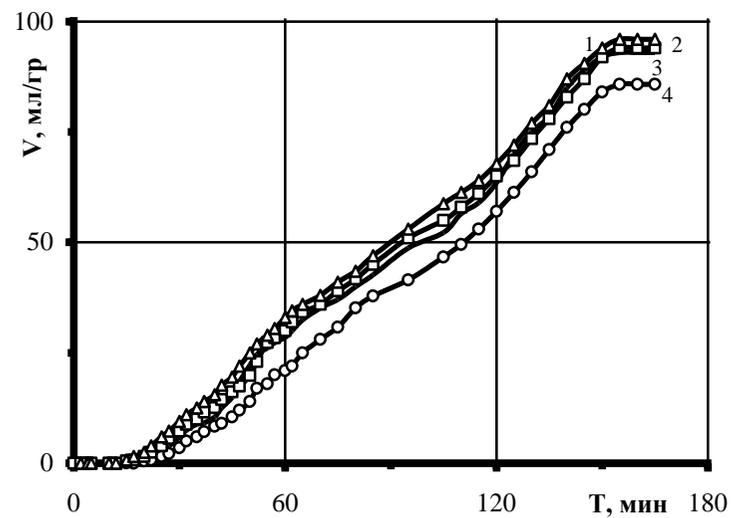
Было установлено (рис.29 а,в), что разложение системы газообразователей ($\text{NaNO}_3 + \text{CaCO}_3$) в исследуемых температурах 600, 700 $^\circ\text{C}$ не позволяет получить пеноматериал с равномерной структурой и низкой кажущейся плотностью.

Как видно из рисунка 29(б) процесс газовыделения смеси газообразователей CaCO_3 и NaNO_3 при температуре 650 $^\circ\text{C}$ проходит более плавно на всем промежутке времени, что способствует равномерному распределению газа в стекломассе и образованию мелкоячеистой структуры в период перехода стекла из твердого состояния в пиропластическое.

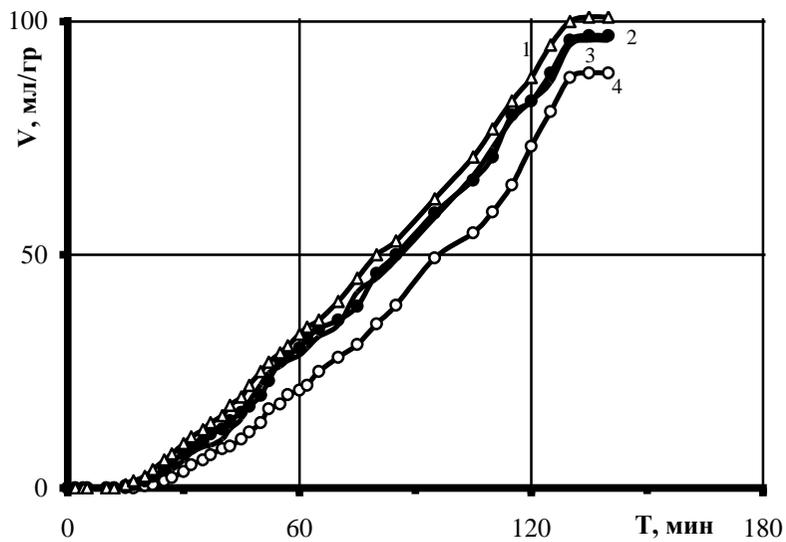
Таким образом, система газообразователей состоящая из карбоната кальция и Нитрата натрия позволяет совместить температуру разложения основного газообразователя и температуру размягчения стекла, что является необходимым условием получения пеноматериала с минимальной кажущейся плотностью.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 29 - Кинетика разложение смеси NaNO_3 , CaCO_3 , при температуре, $^{\circ}\text{C}$ – 600(а), 650(б), 700(в), и соотношении компонентов $\text{NaNO}_3:\text{CaCO}_3 = 1:0,8$ (1); 1:0,6 (2); 1:0,37(3); 1:0,2 (4)

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОМАТЕРИАЛА

Используя результаты полученные в предыдущей главе были определены основные технологические параметры процесса получения пеностекла.

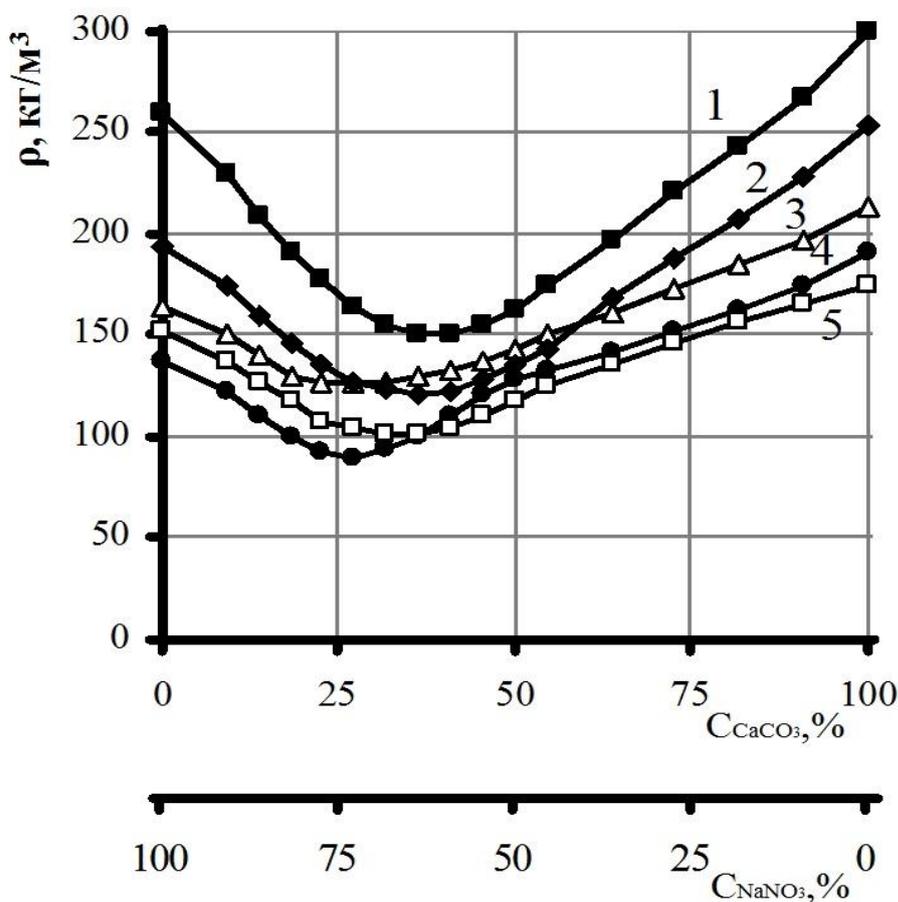


Рисунок 30 - Зависимость плотности вспененного материала от соотношений компонентов газобразователя при $C_{\gamma o} = \text{const}$, при температуре, °C: 500 (1), 550 (2), 600 (3), 650 (4), 700 (5).

На рисунке 30 показано, влияние соотношения используемых газобразователей на кажущую плотность исследуемого пеноматериала при различных температурах. Установлено, что эти зависимости имеют экстремальный характер во всем диапазоне исследуемых температур. Оптимальное соотношение газобразователей зависит от температуры. Так при температуре 500 °C минимальная плотность наблюдается при соотношении $\text{NaNO}_3:\text{CaCO}_3=100:40$, а при температуре 800 °C оптимальное соотношение составляет 1,6%:0,6% которое позволяет получить пеноматериал с плотностью менее 100 кг/м³.

Для определения оптимального количества вводимого газобразователя для получения пеностекла с минимальной кажущейся плотностью, были исследованы

зависимости кажущейся плотности от количества газообразователя. Как видно из рисунка 31 получение минимальной плотности зависит от температуры вспенивания и от количества газообразователя. В интервале температур 600-700 °С, которая является оптимальной для вспенивания, минимальное необходимое количество газообразователя составляет 2% поэтому в дальнейшем при разработке технологии получения пеноматериала, концентрация газообразующей смеси составляет 2,2%.

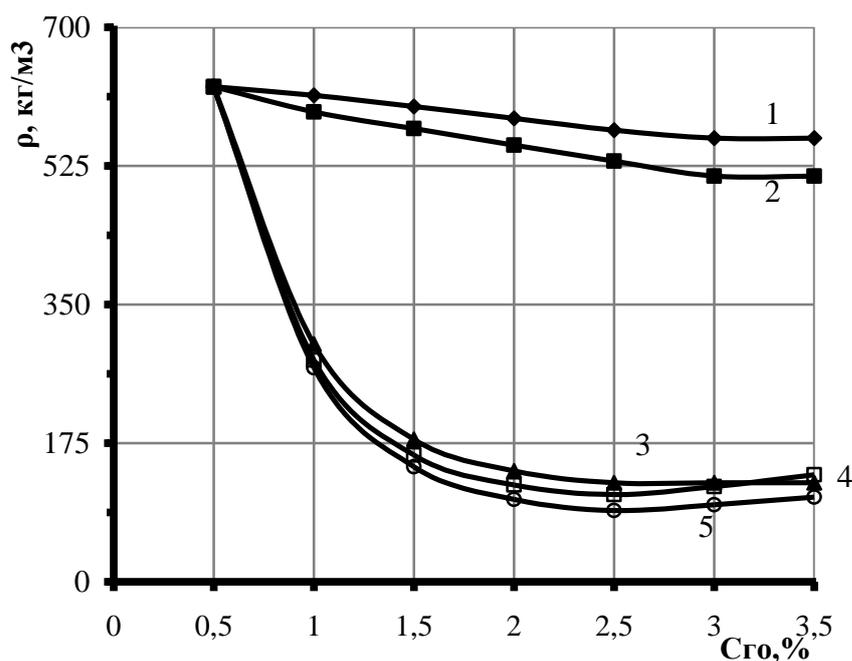


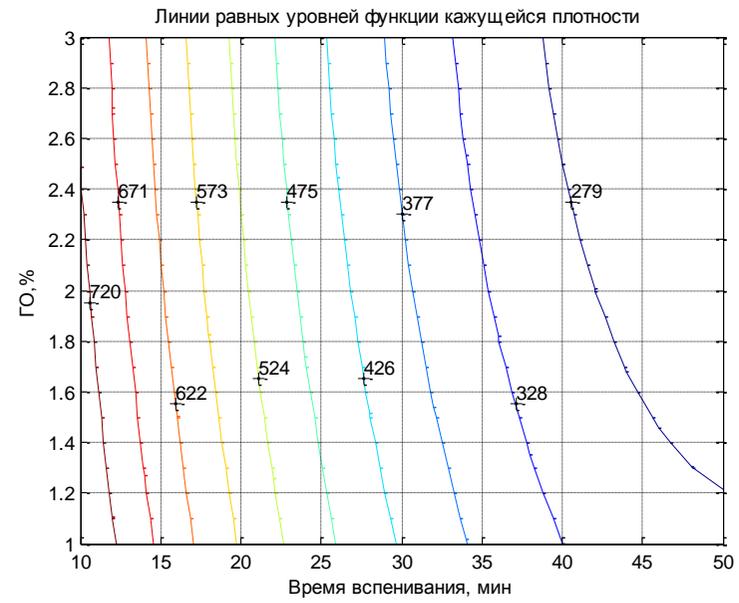
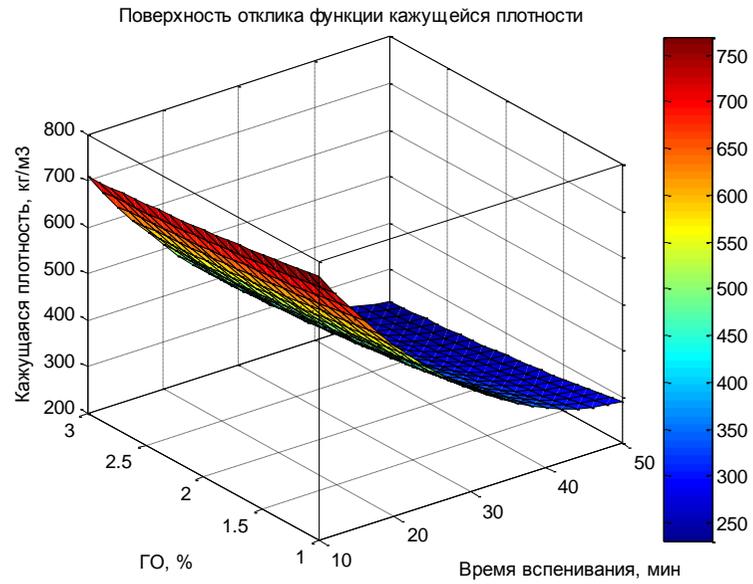
Рисунок 31 - Зависимость плотности пеноматериала от количества газообразующей смеси ($\text{NaNO}_3:\text{CaCO}_3 = 100:37$) при температуре, °С: 500 (1), 550 (2), 600 (3), 650 (4), 700 (5).

С использованием методов математического моделирования были исследованы зависимости кажущейся плотности полученного материала от времени вспенивания при различном содержании исследуемых газообразователей (рис. 32,33,34). Как видно из рисунка 33 минимальная плотность получаемых образцов с использованием газообразователя NaNO_3 составило 160 кг/м^3 , в свою очередь применение CaCO_3 (рис. 32) позволяет получить пеноматериал с плотностью 190 кг/м^3 .

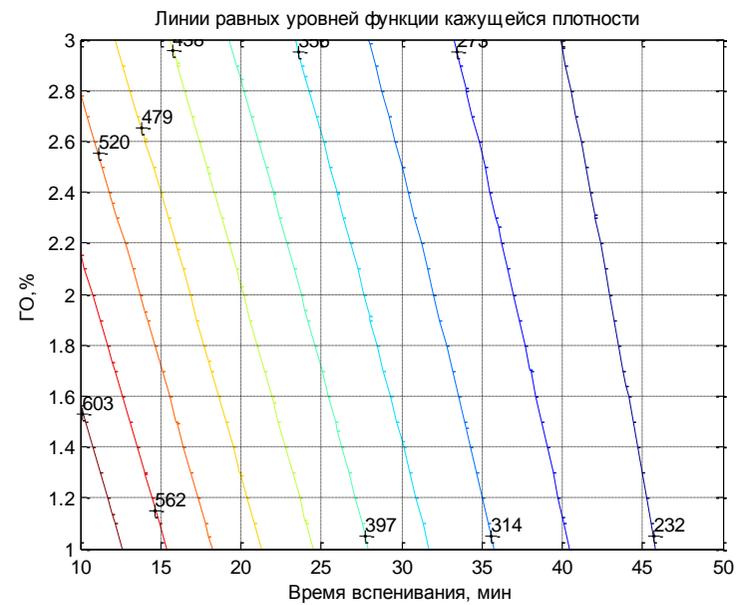
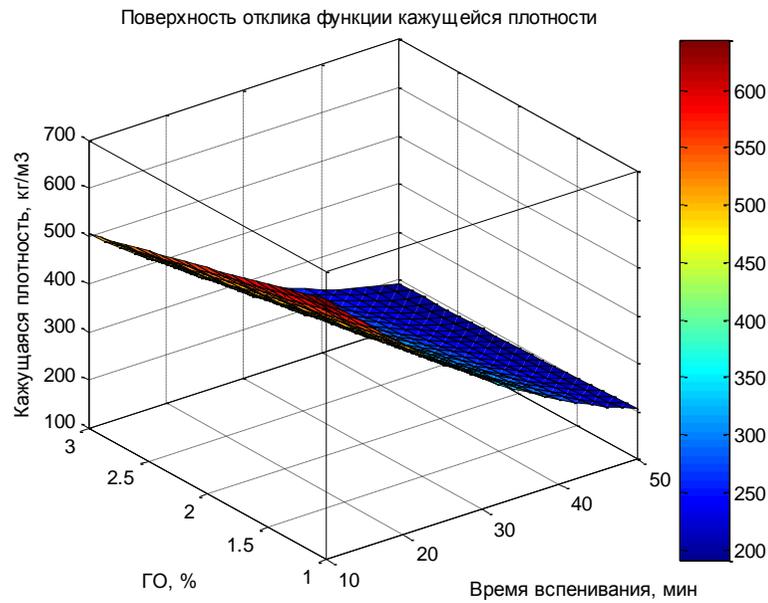
Представленная на рисунке 34 зависимость кажущейся плотности пеноматериала от содержания комплексного газообразователя при соотношении компо-

нентов ($\text{NaNO}_3:\text{CaCO}_3 = 1:0,37$) и времени вспенивания, позволяет определить оптимальное время вспенивания при различных температурах.

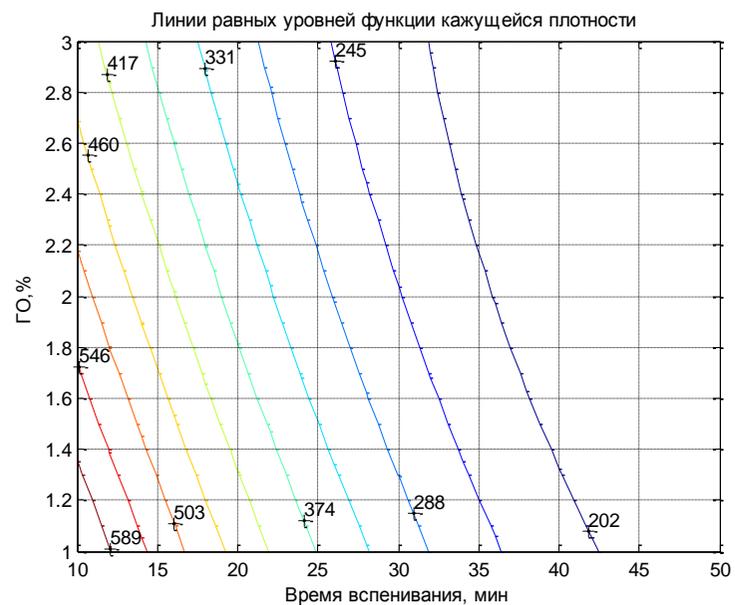
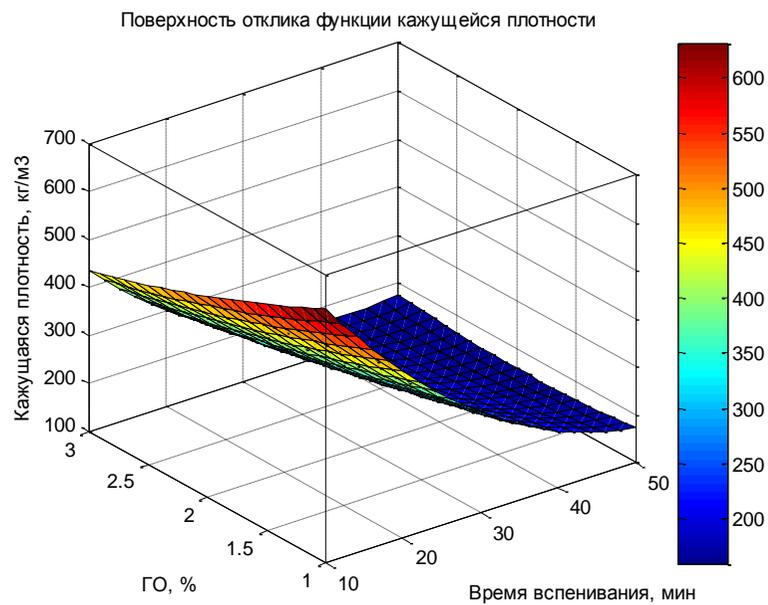
Так при температуре $660\text{ }^\circ\text{C}$, времени вспенивания 20 минут и содержании газообразователя 1,5% минимальная плотность материала составила 240 кг/м^3 , тогда как при вспенивании 40 минут плотность 120 кг/м^3 .



(а)

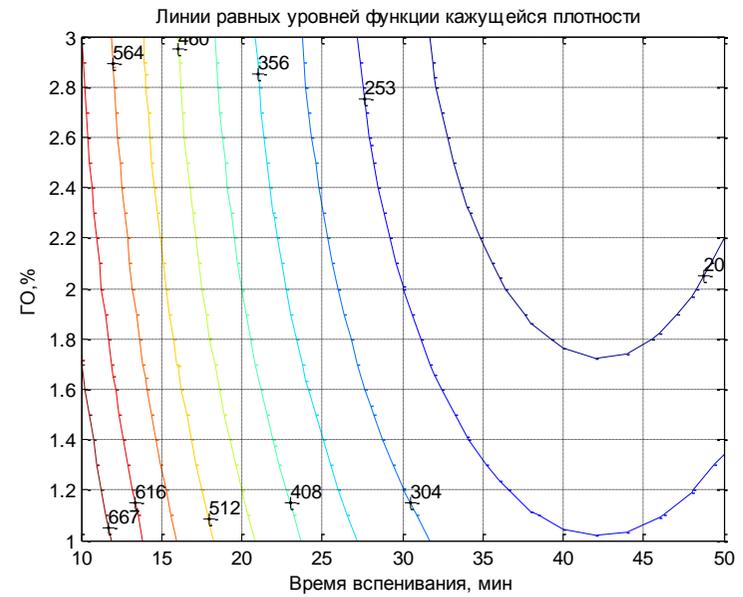
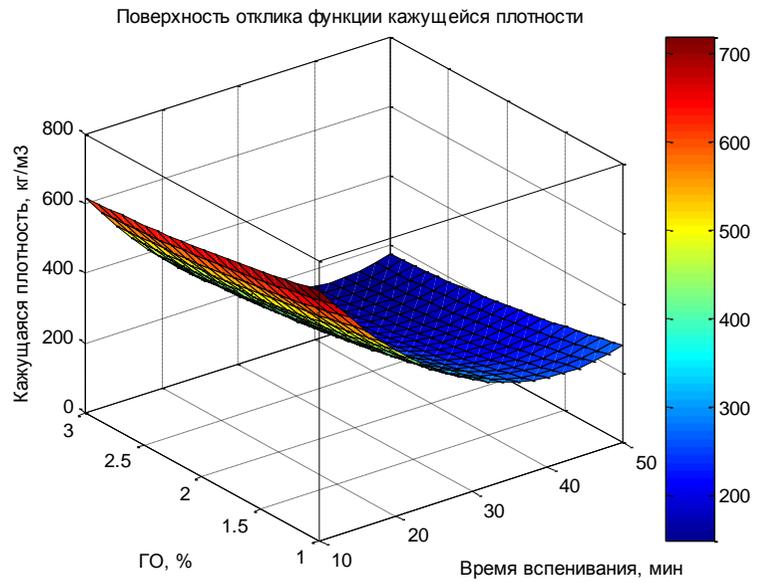


(б)

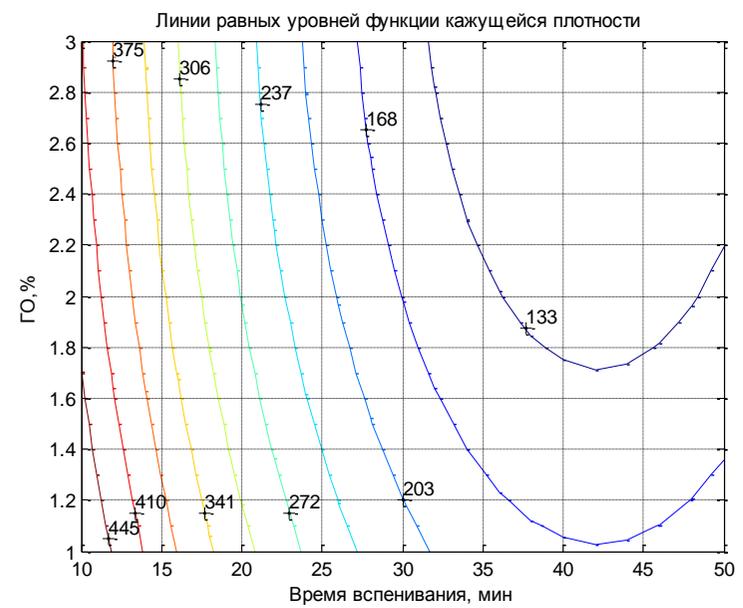
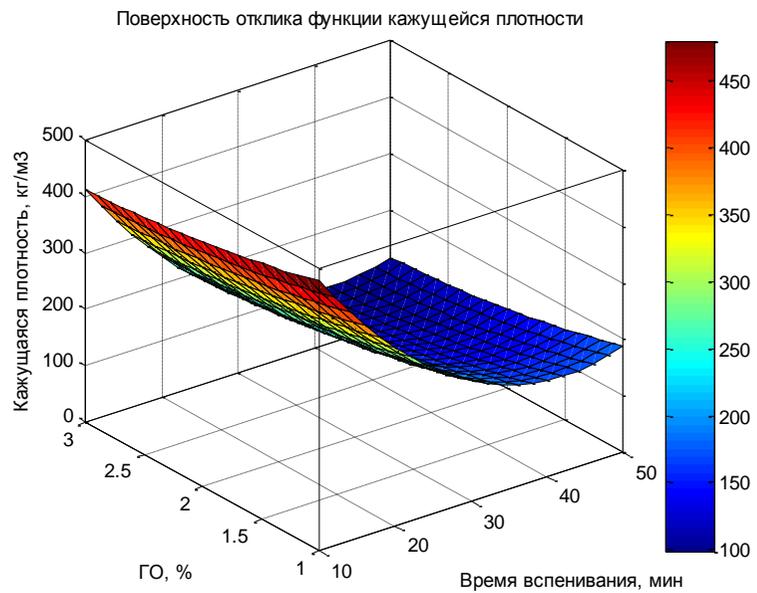


(б)

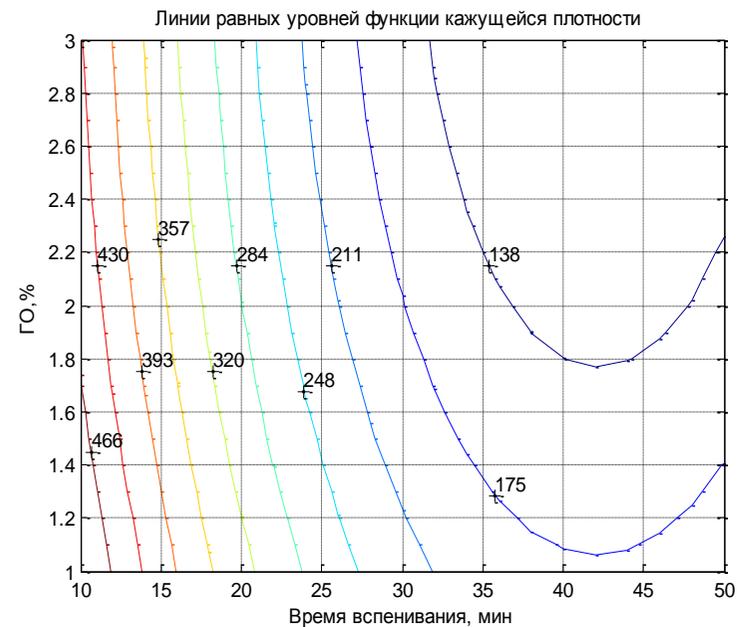
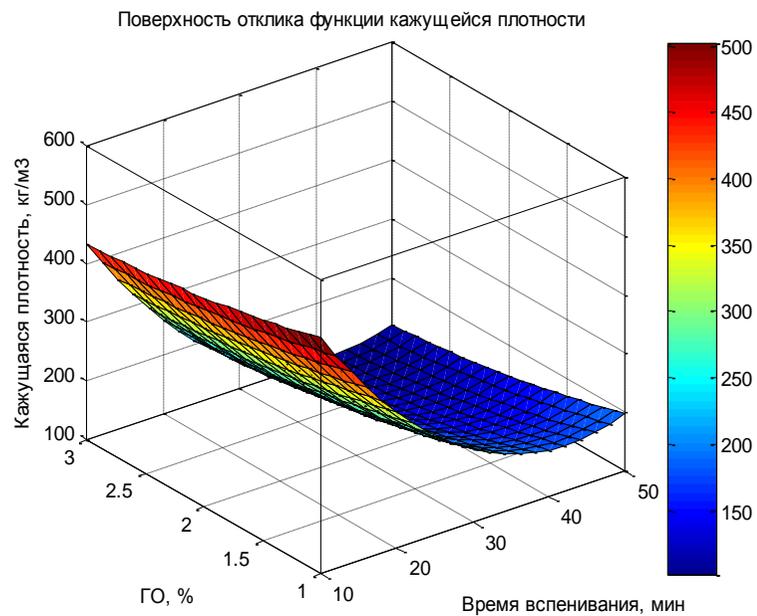
Рисунок 32 - Зависимость кажущейся плотности пеноматериала от содержания газообразователя CaCO_3 и от времени, при температуре, °С – 640 (а), 660 (б), 680 (в).



(a)

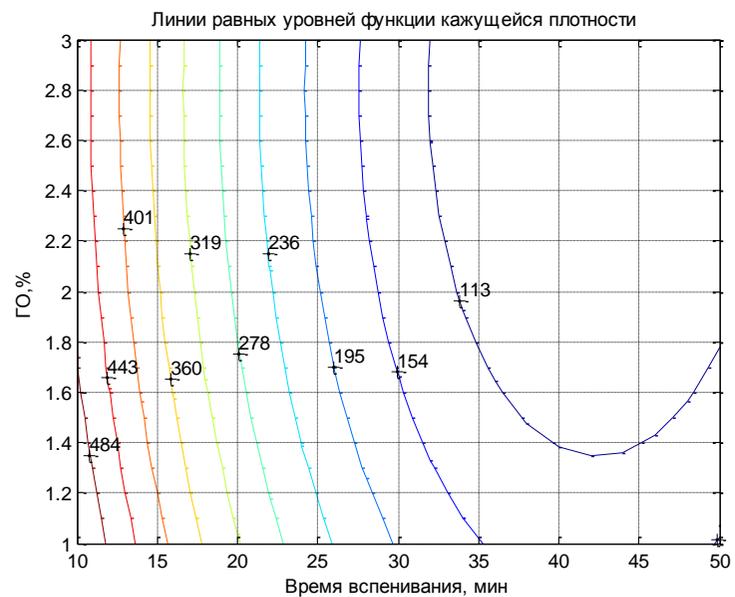
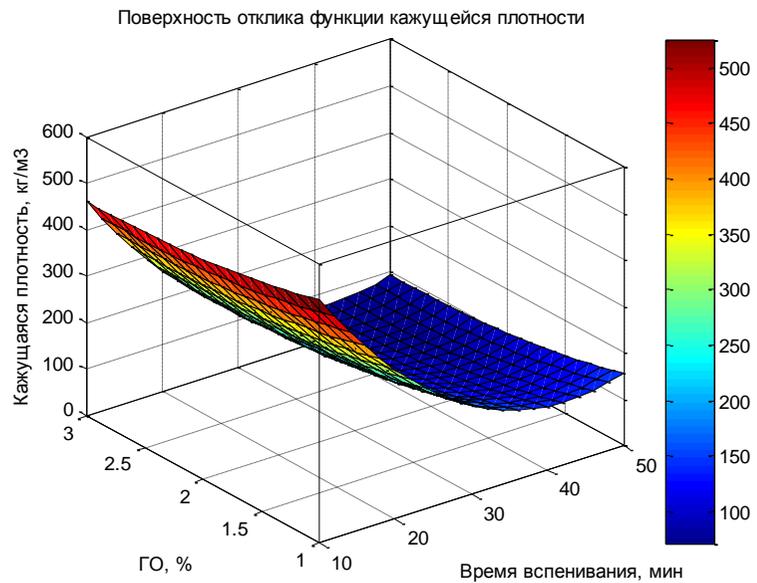


(б)

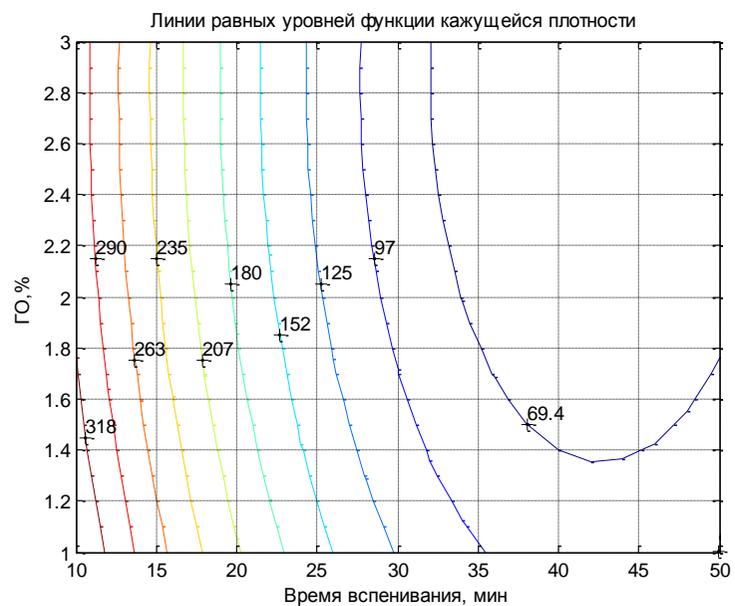
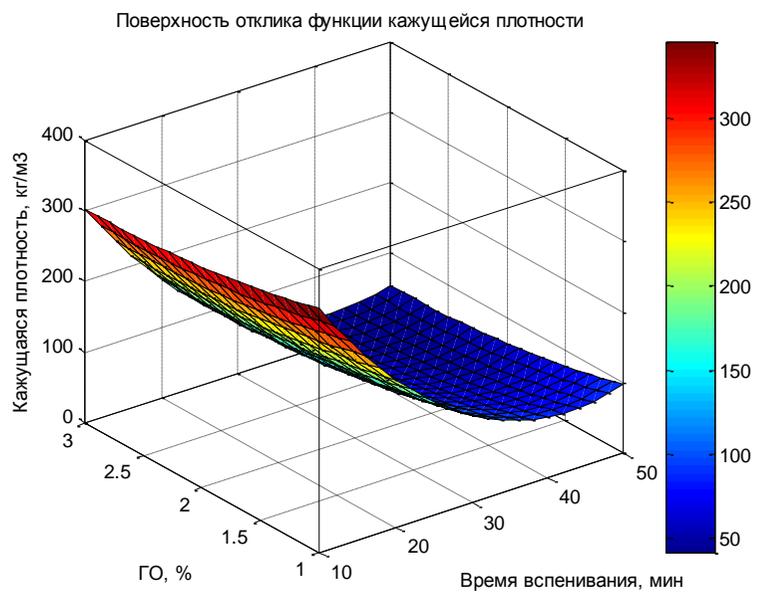


(б)

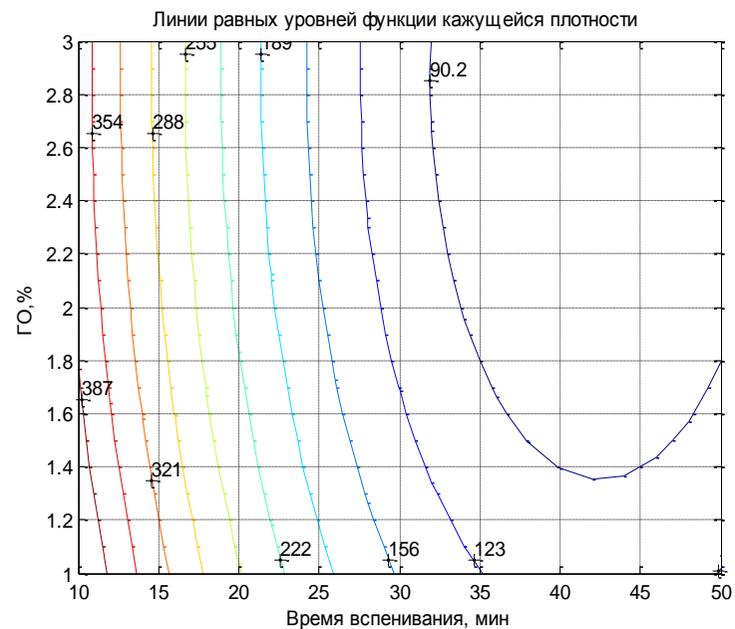
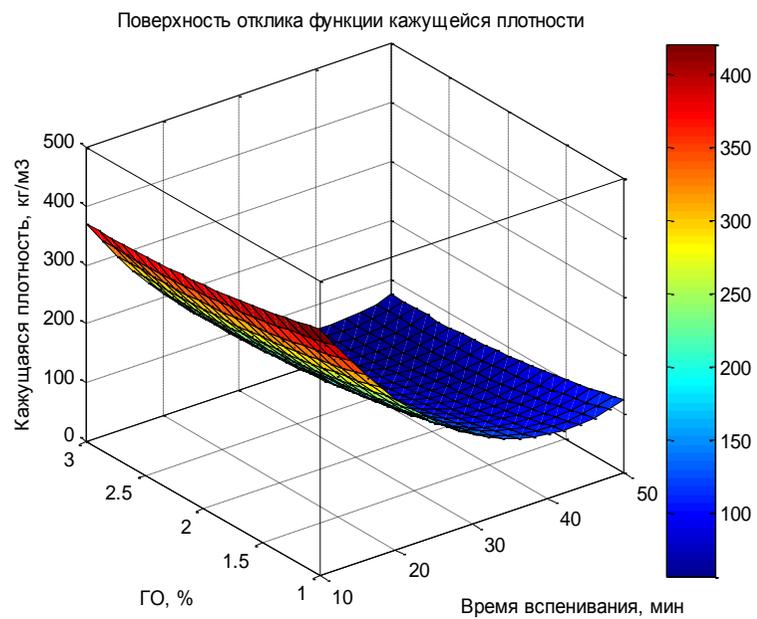
Рисунок 33 - Зависимость кажущейся плотности пеноматериала от содержания газообразователя NaNO_3 и от времени, при температуре, °С – 640 (а), 660 (б), 680 (в).



(a)



(б)



(в)

Рисунок 34 - Зависимость кажущейся плотности пеноматериала от содержания газообразователя ($\text{NaNO}_3 : \text{CaCO}_3 = 1 : 0,37$) и от времени при температурах, °С – 640(а), 660(б), 680(в).

На основании полученных данных были рассчитаны коэффициенты объемного вспенивания. На рисунке 35,36,37 показана зависимость объемного вспенивания от содержания газообразователя NaNO_3 , CaCO_3 и системы $\text{NaNO}_3+\text{CaCO}_3$.

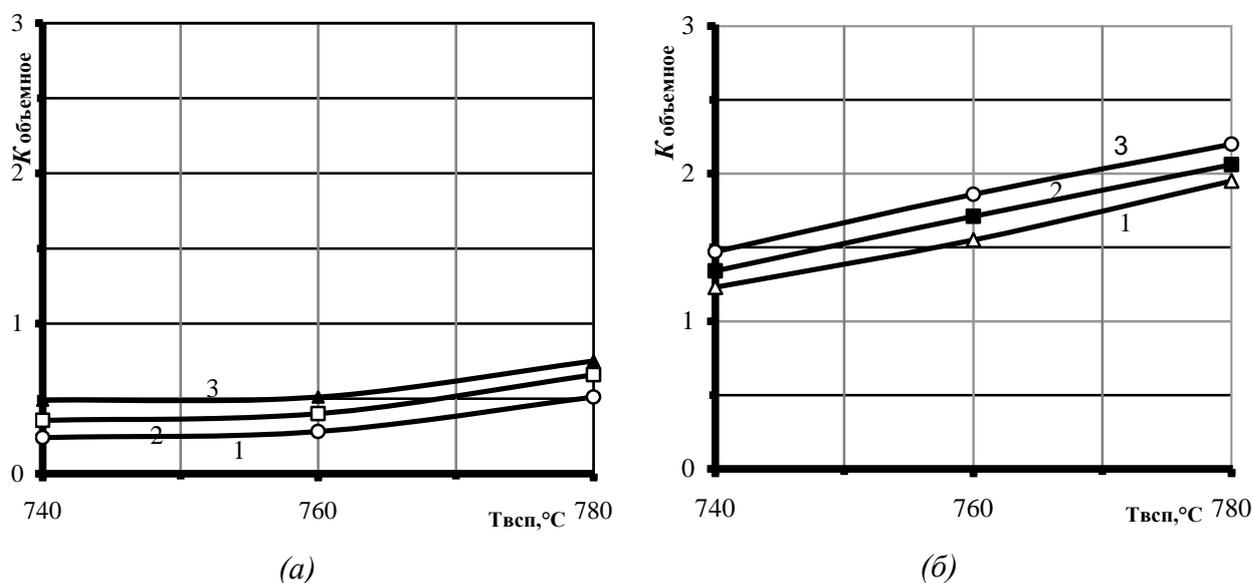


Рисунок 35 - Зависимости коэффициента объемного вспенивания от температуры при CaCO_3 : 0,5% (1), 1,5% (2), 3% (3), и времени вспенивая, мин.: 20 (а), 40 (б)

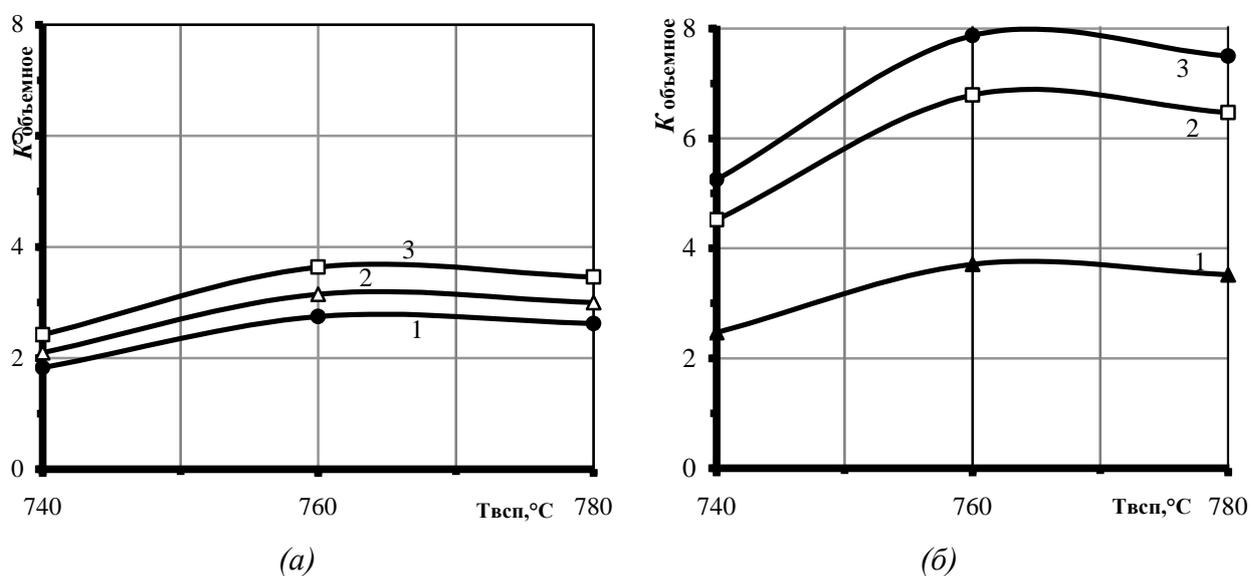


Рисунок 36 - Зависимости коэффициента объемного вспенивания от температуры при NaNO_3 : 0,5% (1), 1,5% (2), 3% (3), и времени вспенивая, мин.: 20 (а), 40 (б)

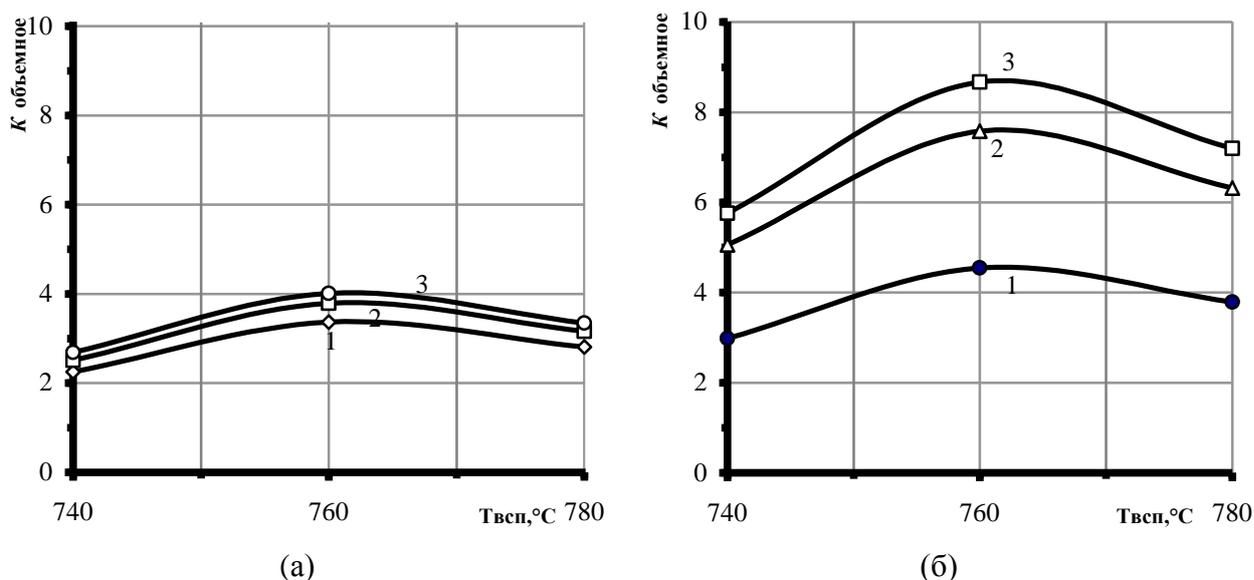


Рисунок 37 - Зависимости коэффициента объемного вспенивания от температуры при NaNO₃+CaCO₃: 0,5% (1), 1,5% (2), 3% (3), и времени вспенивая, мин.: 20 (а), 40 (б)

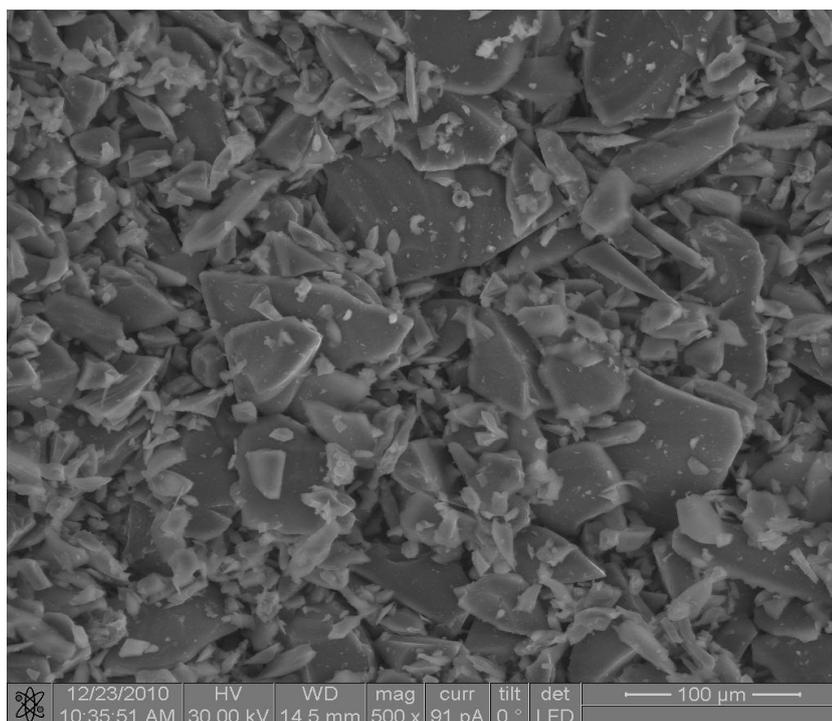
Из представленных на рисунках кривых видно, что наибольшее значения коэффициента объемного вспенивания наблюдаются при времени вспенивания 40 минут. Так используя в качестве газообразователя CaCO₃ (рис. 35 б) при содержании 1,5% и температуре 660 °C коэффициент объемного вспенивания составил не более 2. В свою очередь коэффициент объемного вспенивания образцов с концентрацией газообразователя NaNO₃ в количестве 1,5% при аналогичной температуре составил не менее 4. Экспериментальным путем установлено, получение пеноматериала с максимальным значением коэффициента объемного вспенивания возможно только с использованием системы газообразователя NaNO₃+CaCO₃ в количестве 1,5-3% при температуре 650 °C.

Как известно [112], на качество получаемого пеноматериала значительное влияние оказывает исходное сырье, в первую очередь размеры частиц и состав стекла.

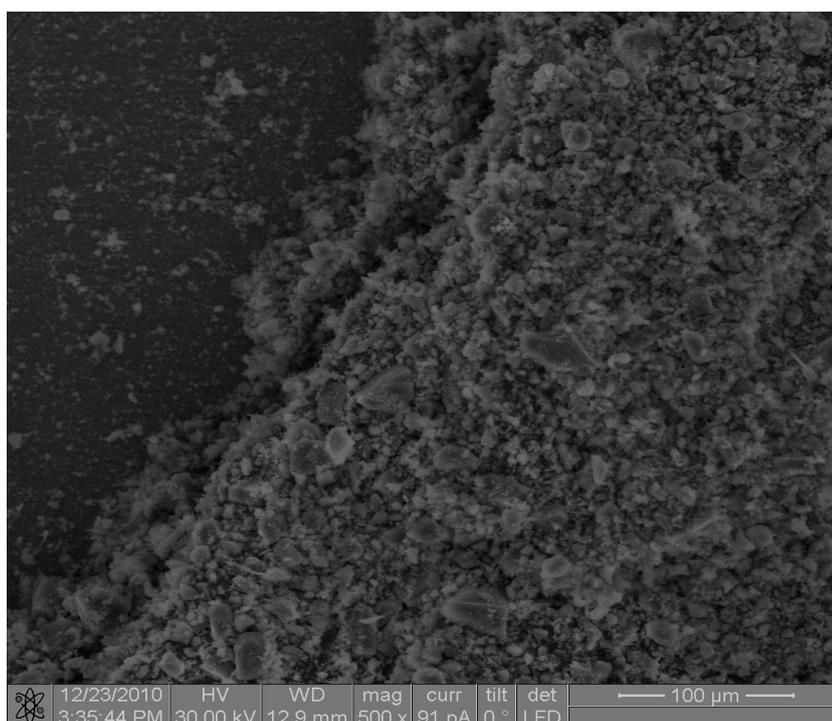
В данной работе использовался стеклобой отходов листового стекла, размолотого до удельной поверхности до 4500 см²/г имеющего постоянный химический состав: SiO₂ - 71,25%; Al₂O₃ - 1,87%; Fe₂O₃ - 0,29%; CaO - 8,0%; MgO - 3,25%; Na₂O - 15,64%. Как показывают многочисленные работы проведенные в области помола наиболее энергетически и экономически выгодным является разрушение частиц по-

рошка ударом и истиранием. Применяемые отходы стекла подвергались дроблению на шаровой вибрационной мельнице типа МВ-400 методом сухого дробления.

Ударное взаимодействие осуществляется за счет взаимодействия частиц стекла со стенками рабочей объема и мелющими телами при высокочастотных колебаниях корпуса. В качестве мелющих тел использовались шары изготовленные из стали твердых сплавов.



(a)



(б)

Рисунок 38 - Электронная микроскопия образцов порошка стекла до помола (a), после помола (б)

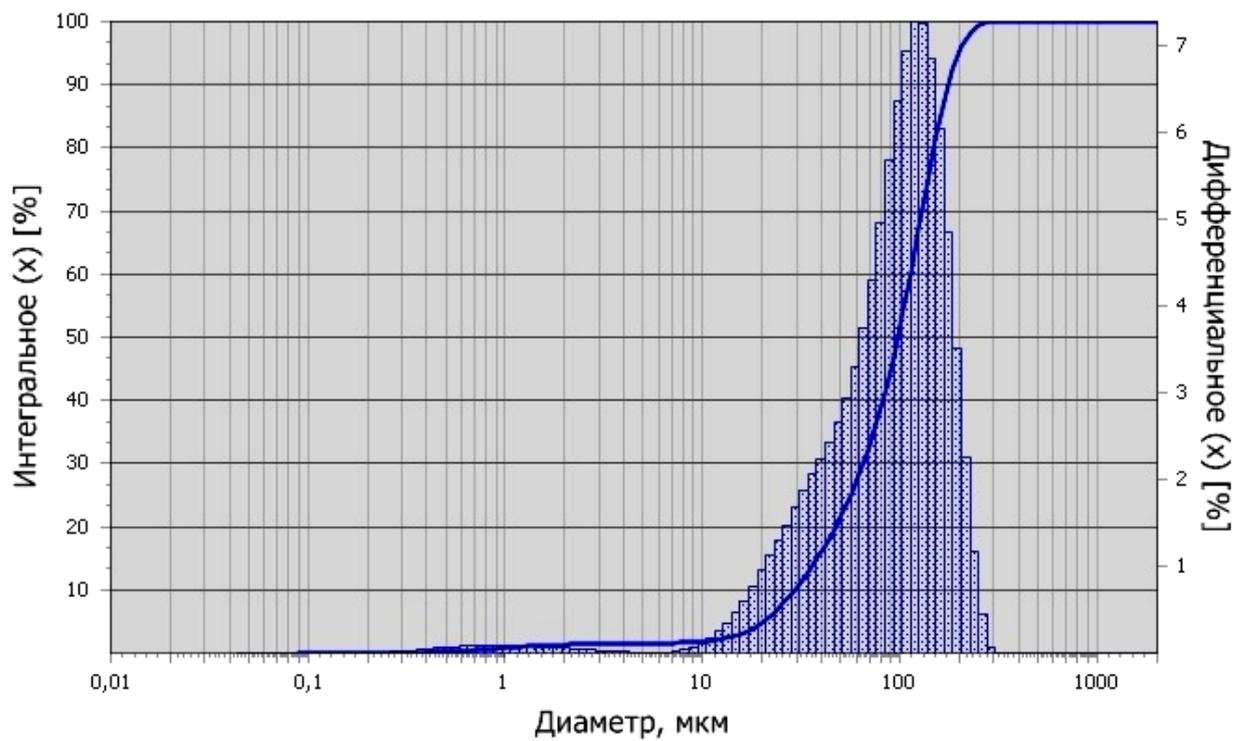
На рисунке 38 представлена электронная микроскопия помола стекла из которого следует, что дробление на шаровой вибрационной мельнице проходит достаточно успешно, а такой тип мельницы применим к данному виду материала.

Таблица 11. Содержание частиц порошка в зависимости от времени помола

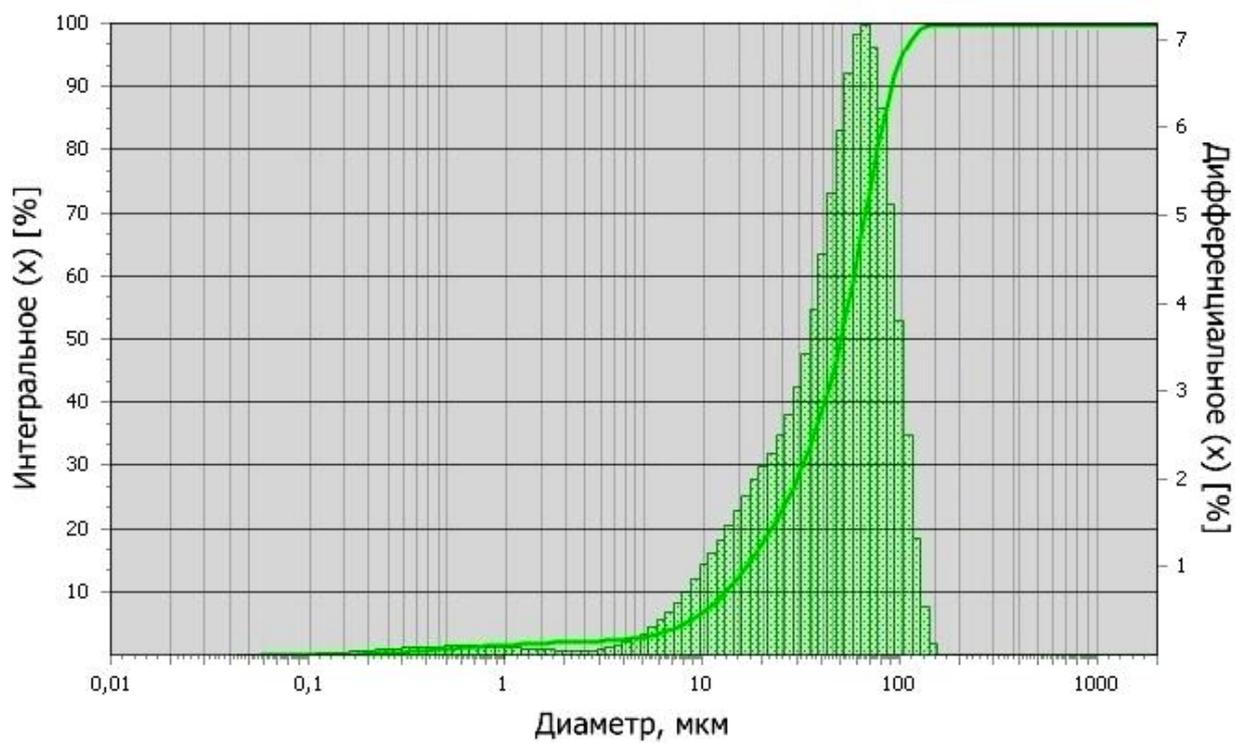
Размер частиц, мкм	Время помола			
	Исходный	20 минут	40 минут	60 минут
	% содержания	% содержания	% содержания	% содержания
120	8	7	5	4
100	14	8	6	5
90	40	37	32	32
75	28	38	46	48
60	10	10	11	11

Исходя из полученных данным представленных в таблице 11 и электронной микроскопии (рис. 38), оптимальным временем дробления порошка можно считать время 40 минут, со средним размером частиц после помола 60-70 мкм. С увеличением времени помола количество мелких частиц увеличивается, но на ряду с этим растут энергозатраты, увеличивается износ оборудования, а следовательно и себестоимость конечного продукта, по причине этого дальнейшее измельчение является не целесообразным и экономически не выгодным.

Наряду с этим была проведена лазерная дифракция образцов порошка стекла до и после помола, анализ проводился на лазерный дифракционном анализаторе ANALYSETTE 22 NanoTec plus, полученные результаты представлены на рисунке 39.



(a)



(б)

Рисунок 39 - Лазерный дифракционный анализ образцов порошка стекла до помола (a), после помола (б)

Как видно из рисунков наблюдается снижение размеров частиц стекла, так максимальное значение частиц до помола находилось в интервале 100-120 мкм, тогда как максимальное значение частиц после помола составило 60 - 70 мкм.

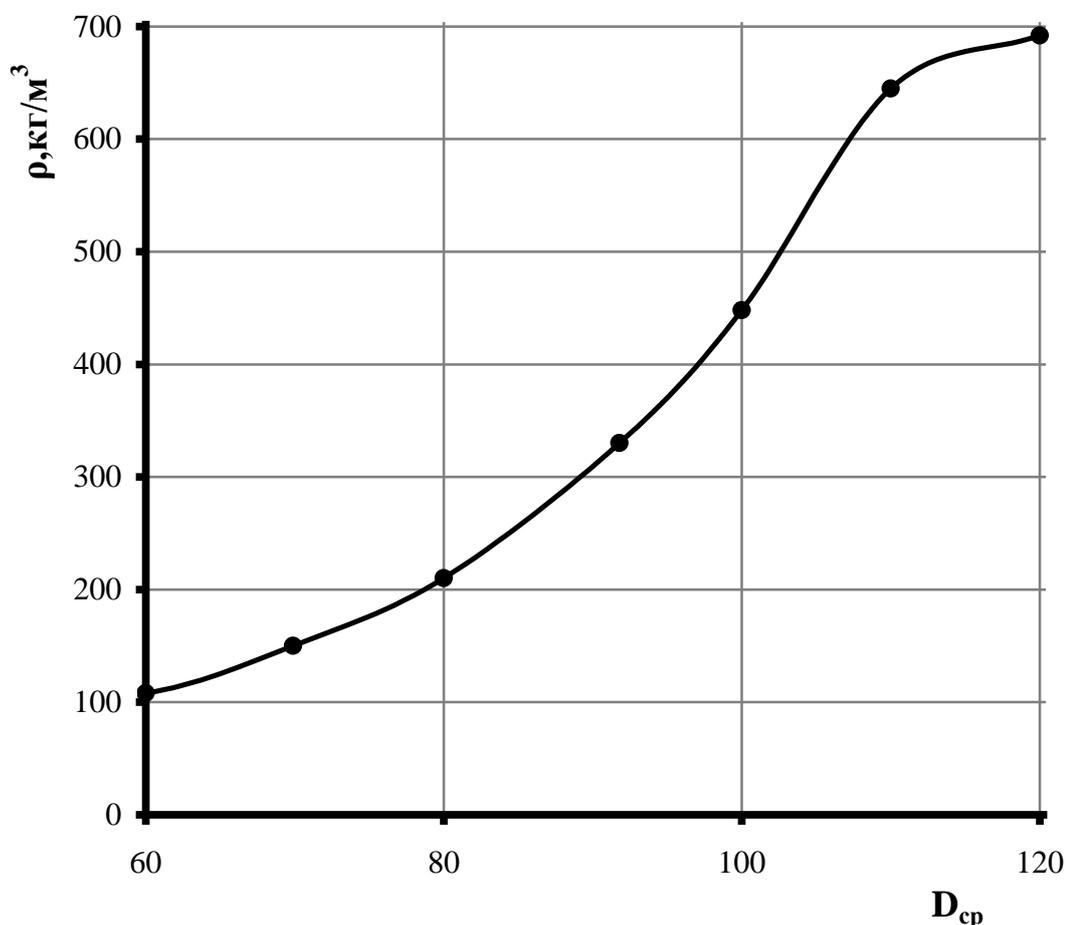


Рисунок 40 - Зависимость плотности пеностекла от среднего размера частиц стекла.

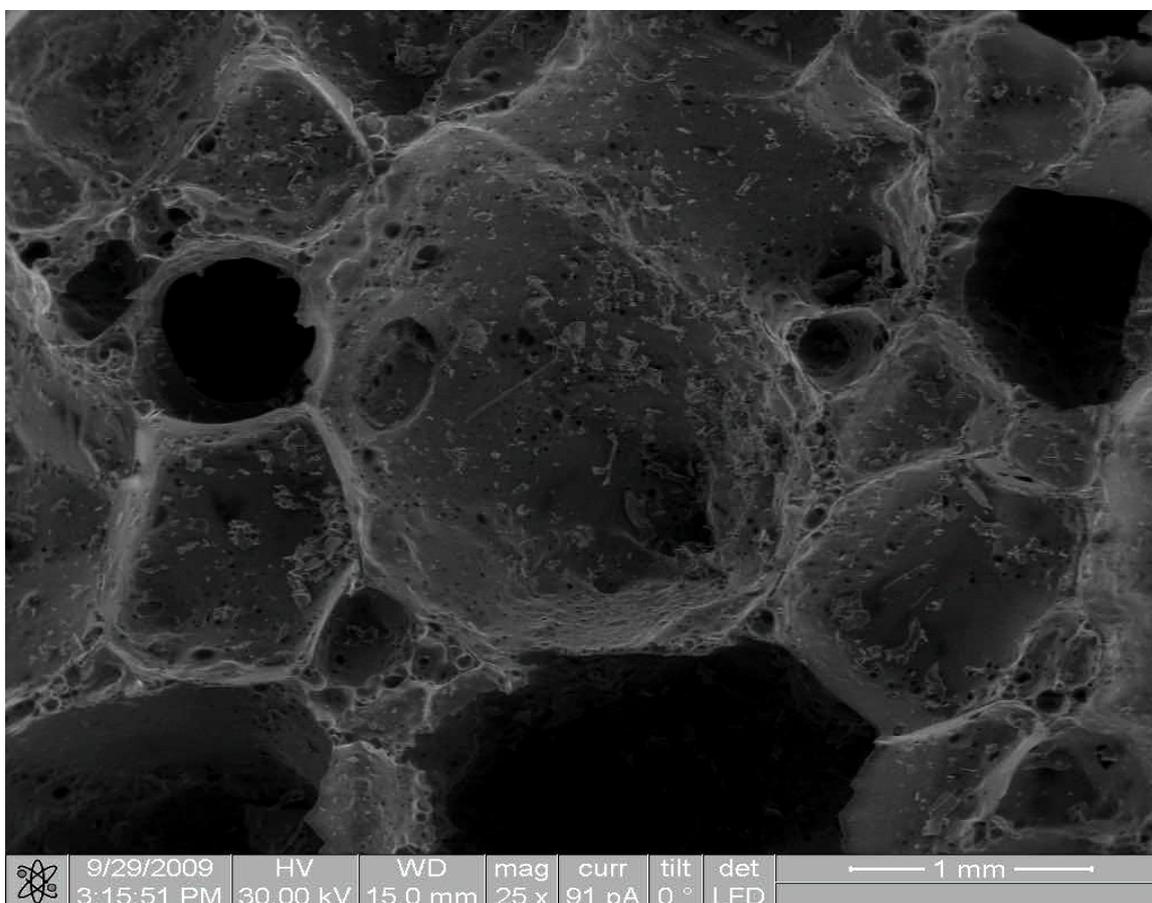
На основании вышеизложенного была выявлена зависимость плотности пеностекла от среднего размера частиц стекла (рис. 40) при разном времени дробления, так при дроблении порошка в течение 20 минут средний размер частиц стекла составляет 80-90 мкм, а средняя плотность пеноматериала составляет 300 кг/м³, тогда как при дроблении в течение 40 минут средний размер частиц стекла составляет 60-70 мкм, а плотность готового пеноматериала составляет менее 200 кг/м³.

Таким образом, при разработке технологии получения пеноматериала выявлены факторы, влияющие на свойства конечного материала и установлены зависимости основных технологических параметров вот этих факторов, что позволило

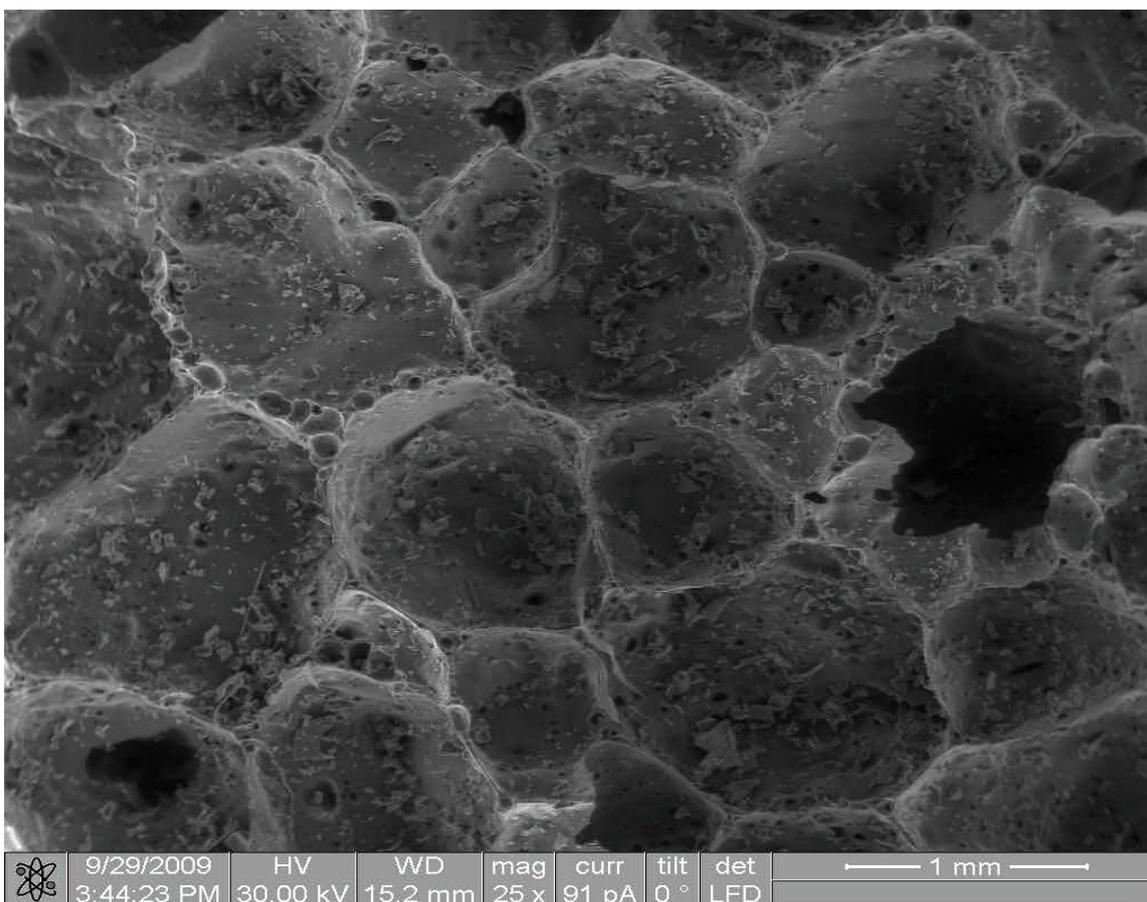
разработать в дальнейшем технологию получения пеноматериала пониженной плотности.

ГЛАВА 5. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННОГО ПЕНОМАТЕРИАЛА

Академик Берлин А.А. один из основоположников теории и практики получения пористых систем в своей работе [102] показал, что основным фактором влияющим на свойства пеноматериала является его плотность, а при одинаковой плотности, равномерность пористой структуры и средний размер пор. Известно [102], что получение равномерной мелкоячеистой структуры возможно при использовании нуклеирующих агентов выполняющих роль зародышеобразователей газовых пузырьков. Обычно нуклеирующими агентами являются мелкодисперсные порошки не изменяющие своих свойств при температуре процесса вспенивания. На рисунке 41 представлены микрофотографии образцов пеноматериала плотностью 180 кг/м^3 .



(a)



(б)

Рисунок 41 - Микрофотографии образцов пеноматериала без нуклеирующего агента (а) и с нуклеирующим агентом (б)

Как видно из рисунка введение нуклеирующего агента (каолина) в количестве 4% уменьшает средний размер и делает структуру пеноматериала более равномерной. Введение каолина в виде порошка ($D_{\text{среднее}}$ 5-20 микрон не требует изменения технологии, поэтому все исследования проводились на образцах содержащих каолин.

На рисунках 42-47 представлены зависимости объемного водопоглощения, прочности при сжатии, сорбционной влажности, паропроницаемости и теплопроводности от кажущейся плотности пеноматериала. Как ожидалось, с уменьшением кажущейся плотности ухудшаются все свойства, при этом показатели материала в сухом и водонасыщенном состоянии практически не отличаются друг от друга, за исключением коэффициента теплопроводности, который при кажущейся плотности 80 кг/м^3 .

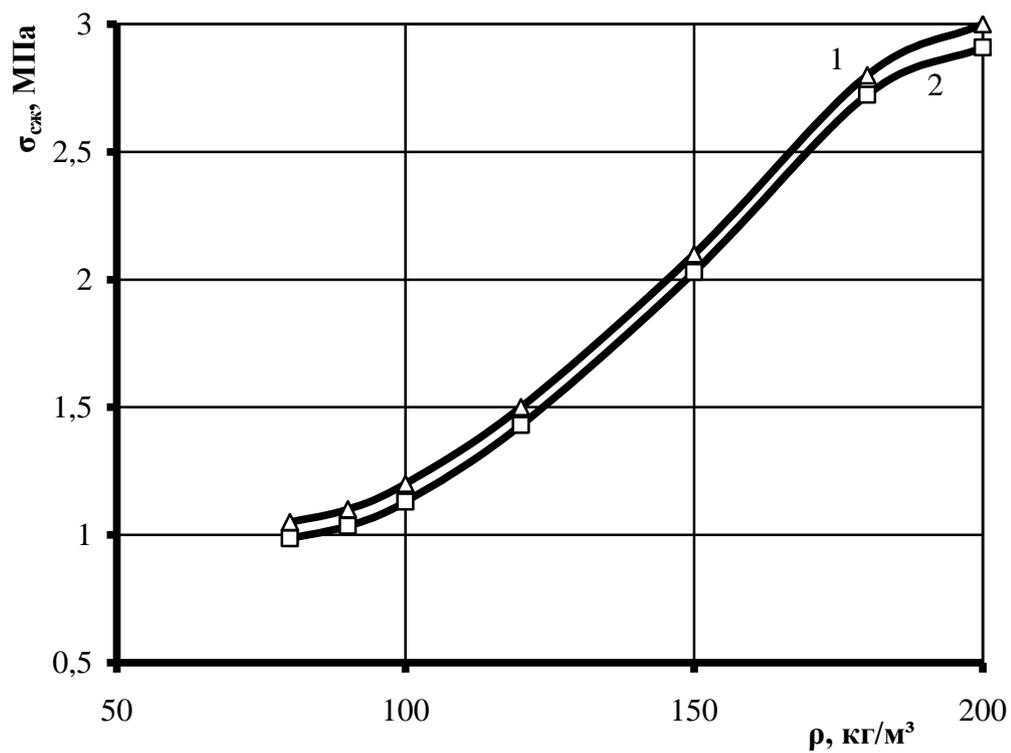


Рисунок 42. Зависимость прочности при сжатии от кажущейся плотности пеноматериала сухое состояние (1), водонасыщенное состояние (2)

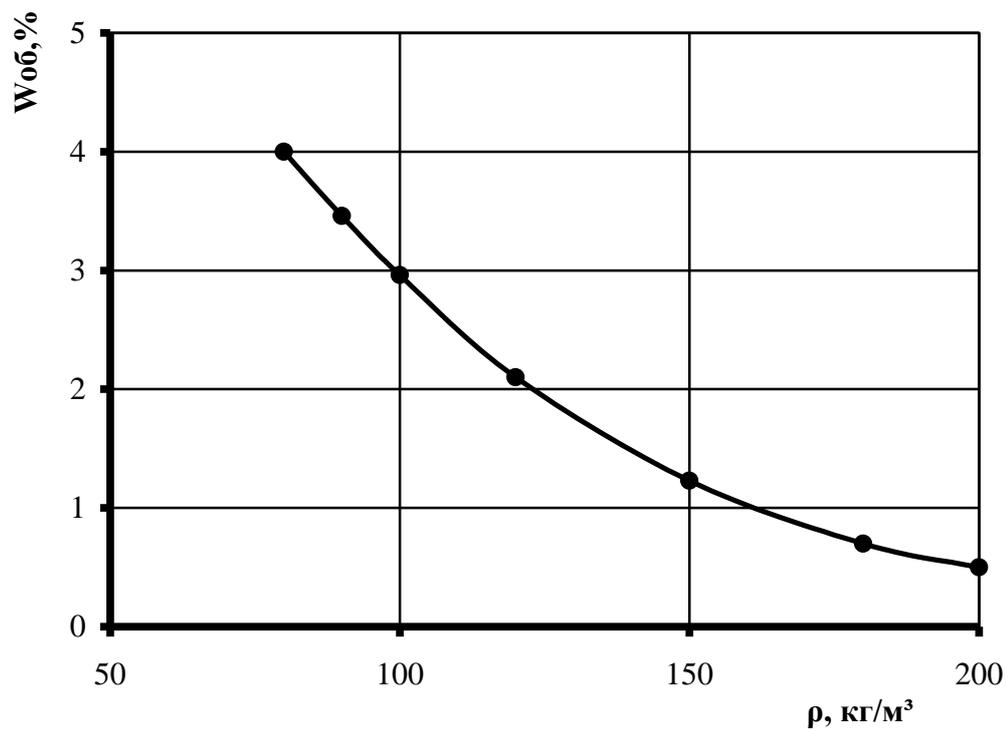


Рисунок 43. Зависимость коэффициента объемного водопоглощения от кажущейся плотности пеноматериала

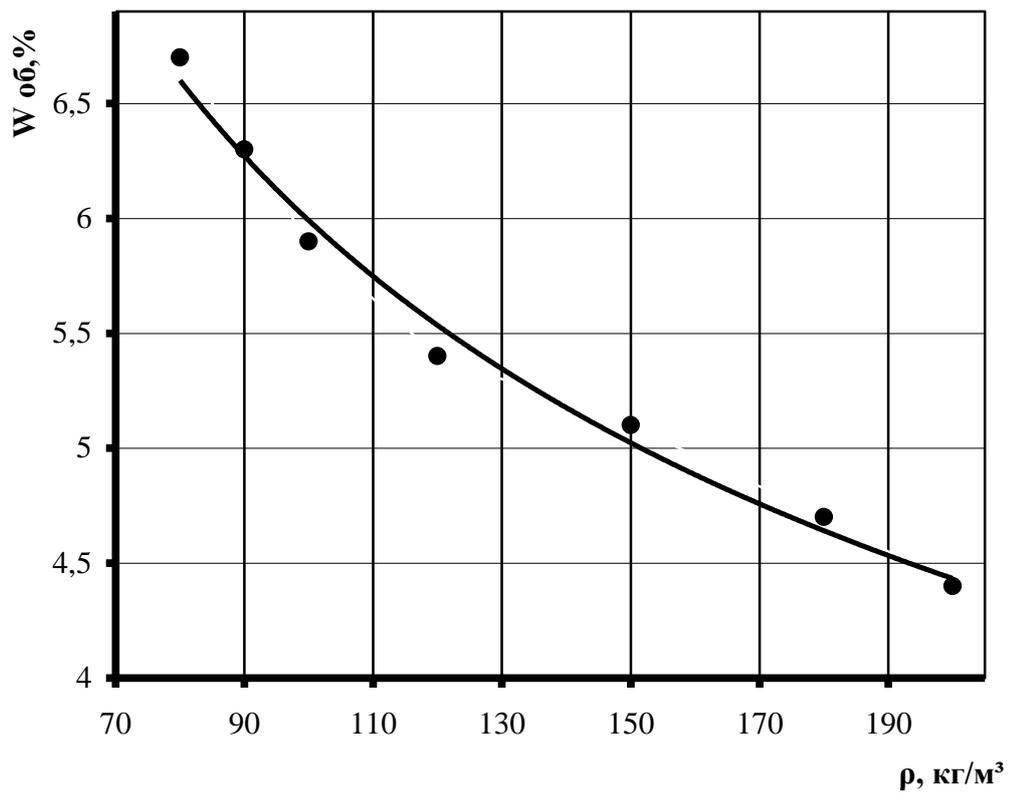


Рисунок 44 - Зависимость коэффициента объемного водопоглощения при кипячении от кажущейся плотности пеноматериала.

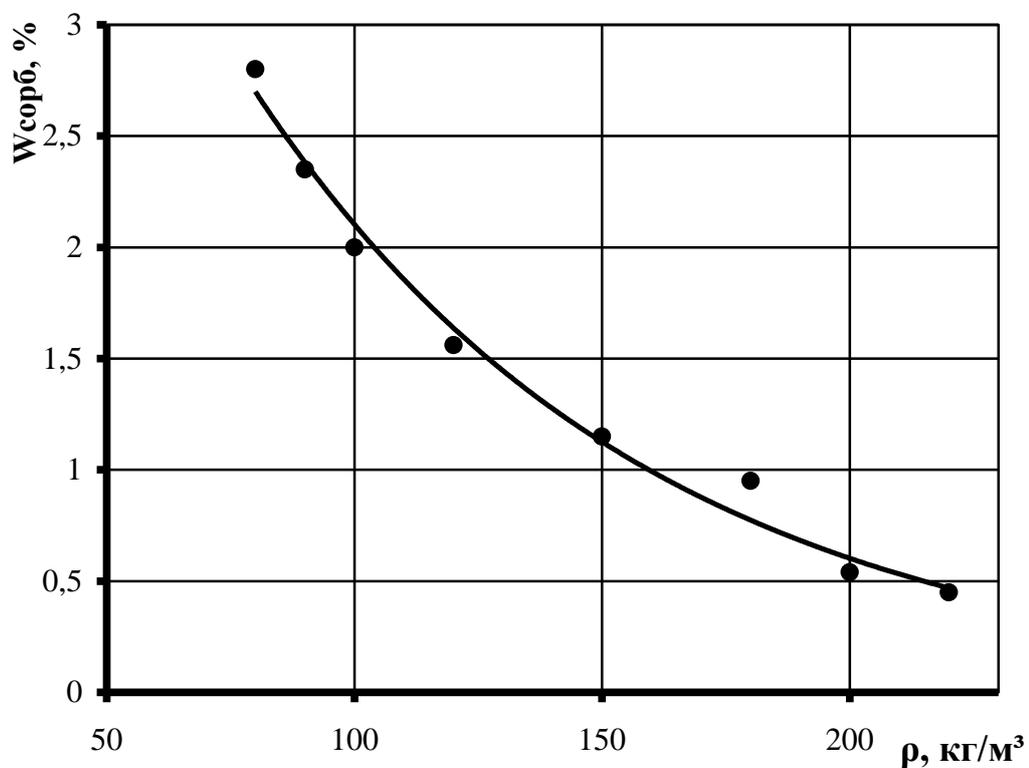


Рисунок 45 - Зависимость коэффициента сорбционной влажности от кажущейся плотности пеноматериала.

Как видно из рисунков, увеличение плотности пеноматериала как ожидалось, способствует повышению прочности при сжатии и снижению водопоглощения и снижению коэффициента сорбционной влажности. При необходимости это позволит, изменяя кажущуюся плотность, регулировать физико-механические свойства пеноматериала.

К теплоизоляционному материалу, который предполагается использовать в строительстве, предъявляется целый ряд требований. В первую очередь паропроницаемость и теплопроводность. Зависимости этих двух параметров от кажущейся плотности представлены на рисунке 46,47.

Под паропроницаемостью подразумевают способность материала удерживать, или пропускать пар. Так, материалы с хорошей паропроницаемостью способствуют выводу пара из помещения, не допуская повышенной влажности. Экспериментальным путем установлено (рис.46), что с повышением плотности пеноматериала коэффициент паропроницаемости смещается в сторону уменьшения, так при плотности пеноматериала 200 кг/м^3 коэффициент паропроницаемости составляет $0,03 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$, тогда как при плотности 150 кг/м^3 - $0,04 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$.

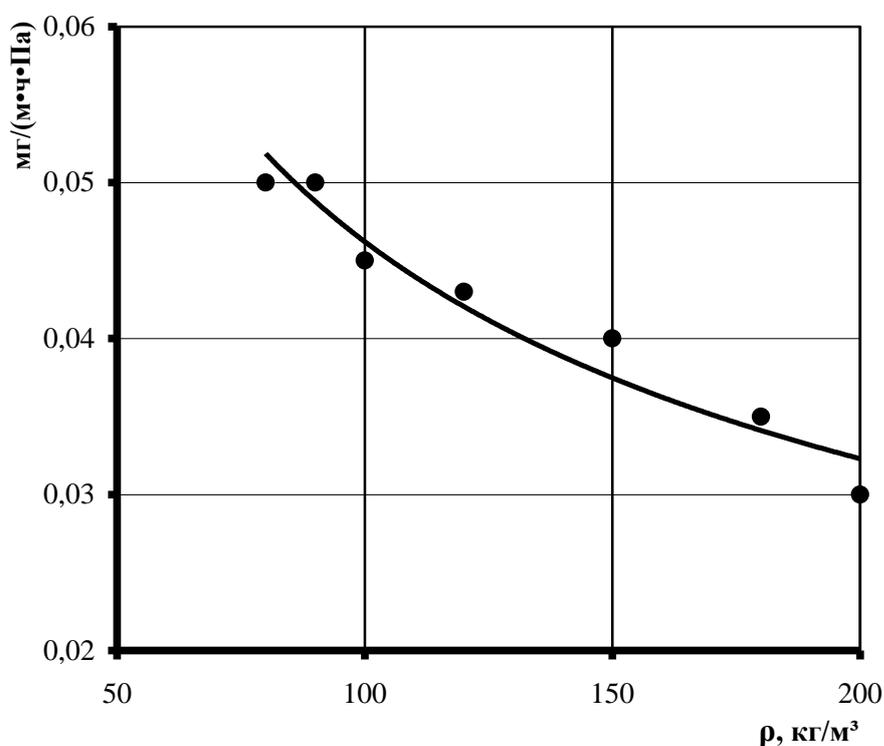


Рисунок 46 - Зависимость коэффициента паропроницаемости от кажущейся плотности пеноматериала.

По нашему мнению такая зависимость обусловлена разным количеством открытых пор в структуре материала, так с увеличением плотности количество открытых пор уменьшается.

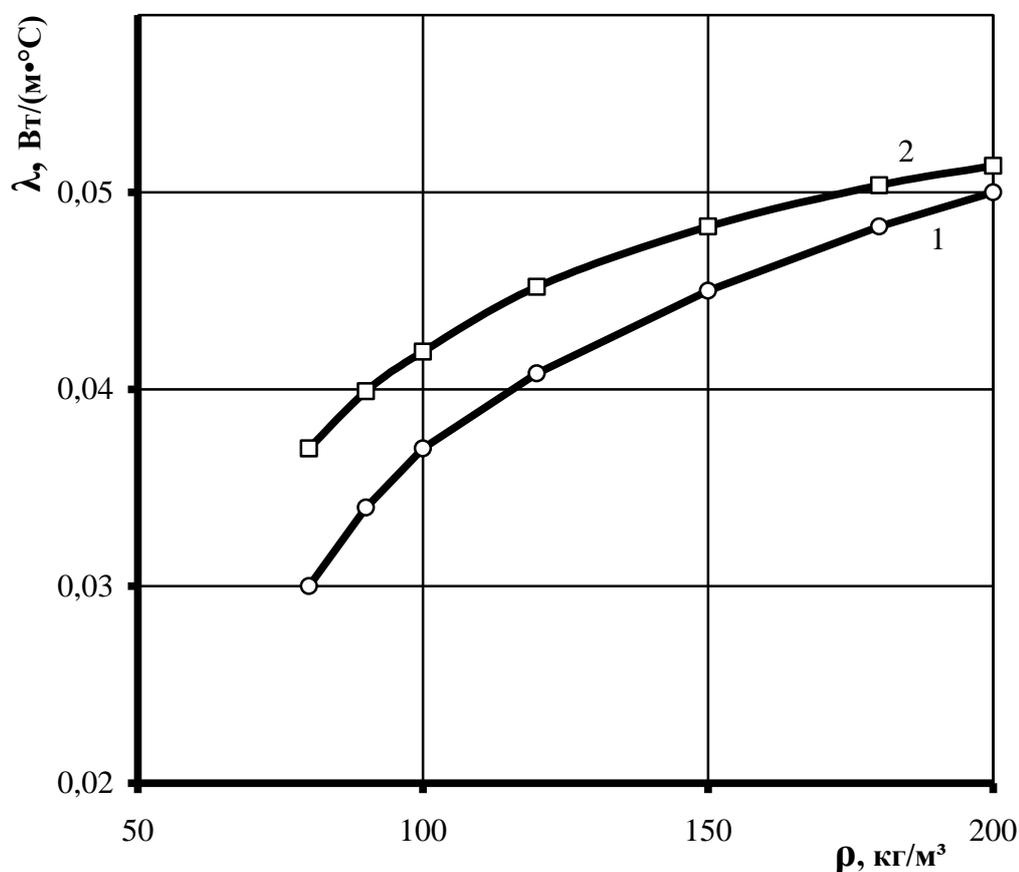


Рисунок 47 - Зависимость коэффициента теплопроводности от кажущейся плотности сухое состояние (1), водонасыщенное состояние (2)

Величина теплопроводности теплоизоляционных материалов зависит от плотности материала, вида, размера, расположения пор. Значительное влияние на теплопроводность оказывает и влажность материала. Как видно из рисунка 47 влажность материала повышает коэффициент теплопроводности 12%, что меньше по сравнению с традиционными теплоизоляционными материалами.

На рисунке 48,49,50 представлены результаты определения общей пористости материала при различных плотностях.

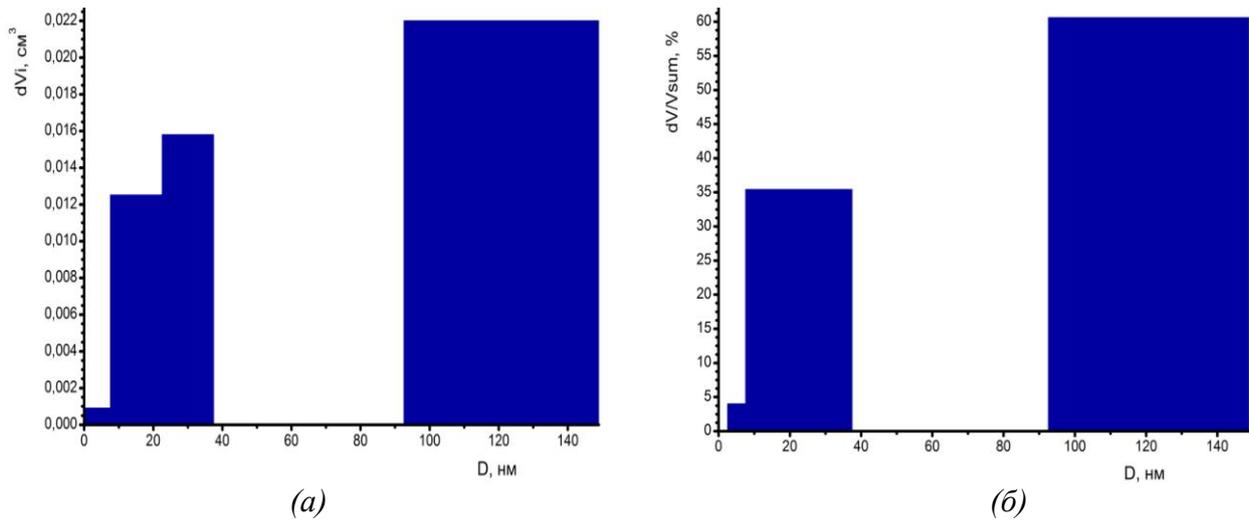


Рисунок 48 - Общая пористость материала при кажущейся плотности 120 кг/м³
 распределение пор по объему (а)
 содержание пор относительно их общего объема (б)

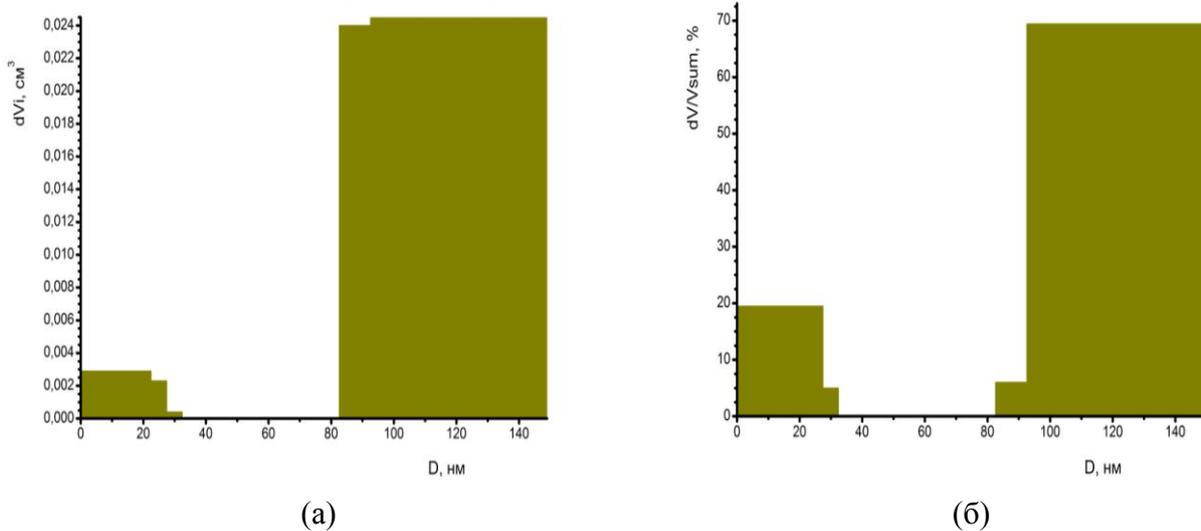


Рисунок 49 - Общая пористость материала при кажущейся плотности 150 кг/м³
 распределение пор по объему (а)
 содержание пор относительно их общего объема (б)

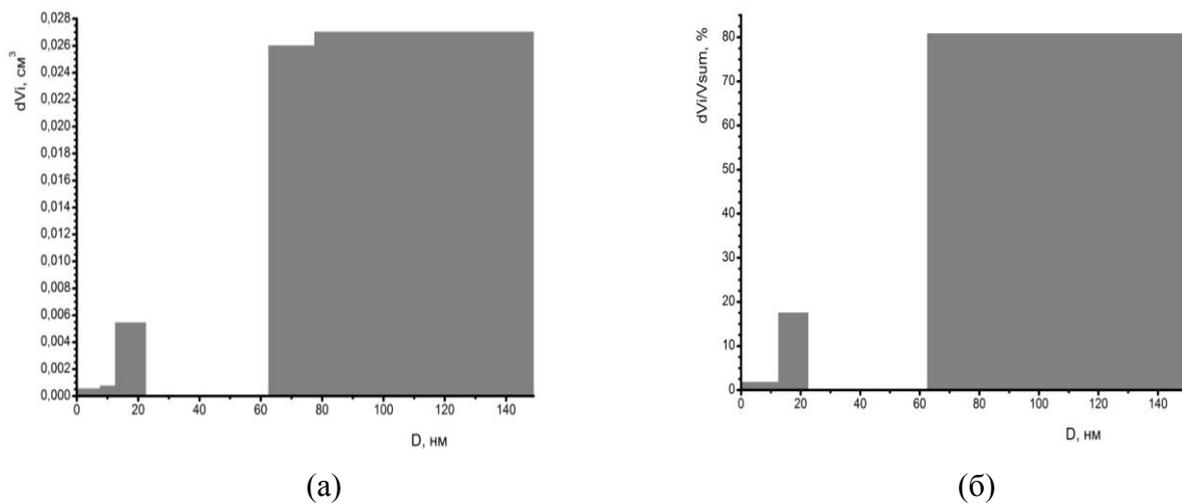


Рисунок 50 - Общая пористость материала при кажущейся плотности 200 кг/м³
 распределение пор по объему, (а) содержание пор относительно их общего объема (б)

Как видно из рисунков во всем исследуемом диапазоне плотностей наблюдается два типо-размера пор со средним диаметром 10-20 мкм и 110-130 мкм при этом, чем меньше плотность пеноматериала, тем больше процент пор со средним диаметром 10-20 мкм, что, по нашему мнению, будет способствовать улучшению климатических условий внутри помещения.

Большое значение для строительных материалов имеет их морозостойкость, поэтому в работе изучалась зависимость выше исследованных свойств от количества циклов заморозки. Для исследования влияния морозостойкости (рис.51 а, б, в) на эксплуатационные свойства пеноматериала был проведён активный эксперимент.

Для нахождения аналитических зависимостей коэффициента теплопроводности (рис. 51(а)), прочности на сжатие (рис. 51(б)), водопоглощения (рис. 51 (в)) от кажущейся плотности и количества циклов заморозки данные обрабатывались с Matlab - программы. К реализации был принят D-оптимальный план, полученный с помощью команды системы Matlab, позволяющий провести математическую, статистическую обработку экспериментальных данных при варьировании 2-х факторов (плотность - X_1 , число циклов заморозки - X_2) на 3-х уровнях.

В работе, в качестве математического описания использован полный квадратный полином вида:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2, \quad (17)$$

где, $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ – коэффициента регрессии; x_1, x_2 - безразмерные входные переменные, которые рассчитываются по уравнениям:

$$x_j = \frac{X_j - X_{oj}}{h_j}, \quad (18)$$

где, x_j - безразмерная j-ая входная переменная, X_j - размерная j-ая входная переменная, h_j - интервал варьирования j-ой входной переменной, рассчитываемой по уравнению:

$$h_j = \frac{X_j^{\max} - X_j^{\min}}{2}, \quad (19)$$

X_{oj} - среднее значение размерной j -ой входной переменной, рассчитываемый по уравнению:

$$h_{oj} = \frac{X_j^{\max} - X_j^{\min}}{2}, \quad (20)$$

где, X_j^{\max} , X_j^{\min} - максимальное и минимальное значение размерной j -ой входной переменной.

Для установления этих зависимостей была разработана Matlab-программа:

```
X=[1.00    -1.00    1.00    -1.00    1.00    1.00
    1.00    -1.00   -1.00    1.00    1.00    1.00
    1.00    -1.00    0        0        1.00    0
    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00
    1.00    1.00   -1.00   -1.00    1.00    1.00
    1.00    1.00    0        0        1.00    0
    1.00    0        1.00    0        0        1.00
    1.00    0       -1.00    0        0        1.00
    1.00    0        0        0        0        0];
y=[0.0375;0.03;0.034;0.058;0.05;0.054;0.053;0.045;0.049];
b=regress(y,x);
yr=x*b;
disp('Коэффициенты регрессии b')
disp(b');
disp('Расчетные данные ');
disp(' y   yr   y-yr');
disp([y yr y-yr]);
x1min=80;x1max=180;
x2min=0;x2max=100;
dx1=(x1max-x1min)/50;
dx2=(x2max-x2min)/50;
[x1,x2]=meshgrid([x1min:dx1:x1max],[x2min:dx2:x2max]);
yy=b(1)+b(2)*(x1-140)/60+b(3)*(x2-50)/50+b(4)*(x1-140)/60*(x2-50)/50+b(5)*((x1-140)/60).^2+b(6)*((x2-50)/50).^2;
surf(x1,x2,yy);box;grid on;
xlabel('плотность');
colorbar;
ylabel('число циклов');
zlabel('теплопроводность');
title('Поверхность отклика функции ');
figure;
```

```

c=contour(x1,x2,yy,10);
clabel(c);
grid on;xlabel('плотность ');ylabel('число циклов');
title('Линии равных уровней функции ');

```

При изучении влияния входных переменных плотности - X_1 (кг/м³) и количества циклов заморозки - X_2 (цикл.) на теплопроводность, прочности на сжатии и водопоглощение входные переменные изменялись в интервалах:

$$X_1^{\min} \leq X_1 \leq X_1^{\max}, \quad X_2^{\min} \leq X_2 \leq X_2^{\max} \quad (21)$$

где, $X_1^{\min} = 80$ кг/м³, $X_1^{\max} = 180$ кг/м³, $X_2^{\min} = 0$ цикл., $X_2^{\max} = 100$ цикл.

Расширенная матрица планирования в безразмерных координатах, для получения уравнений регрессии в виде полного квадратного полинома (табл. 12).

Таблица 12. Расширенная матрица планирования в кодированных переменных

X_0	X_1	X_2	$X_1 \cdot X_2$	X_1^2	X_2^2
1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00
1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	-1.00	0	0	1.00	0
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	0	0	1.00	0
1.00	0	1.00	0	0	1.00
1.00	0	-1.00	0	0	1.00
1.00	0	0	0	0	0

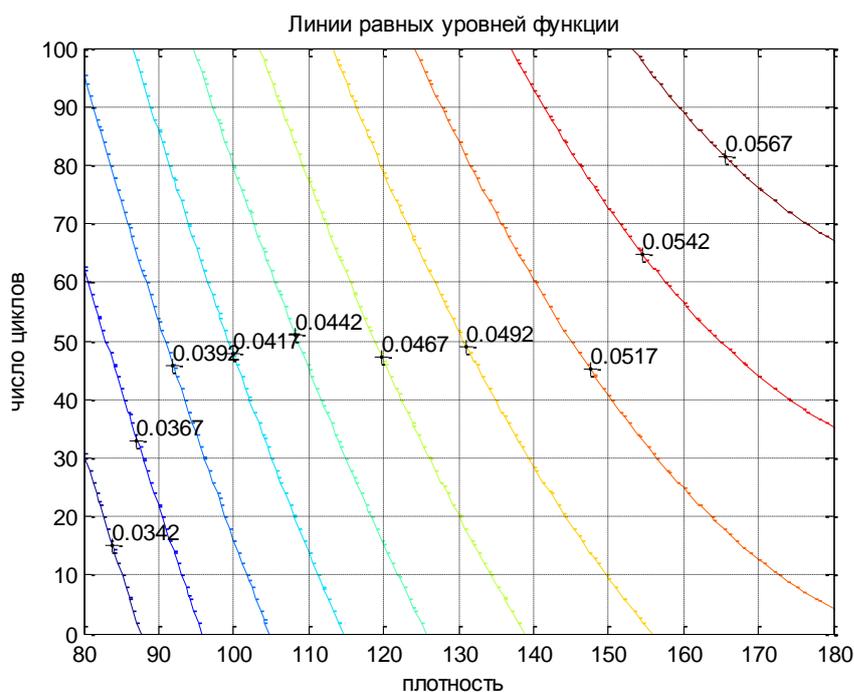
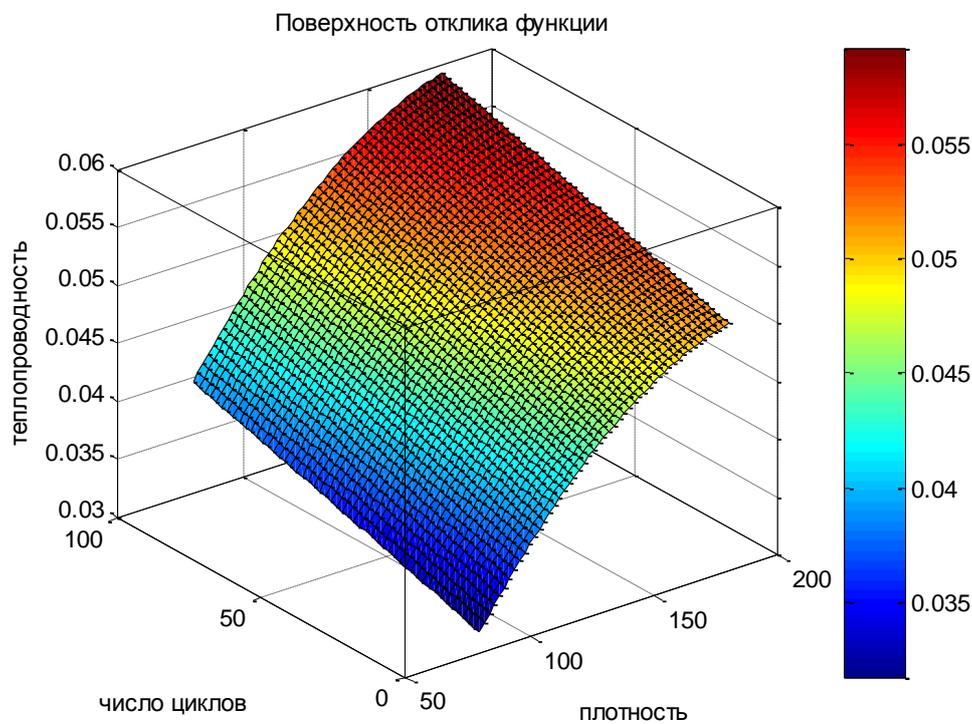
После обработки экспериментальных данных на ПЭВМ с помощью разработанной Matlab - программы были получены уравнения регрессии в натуральных величинах, имеющие следующий вид:

$$\lambda, [\text{Вт/м} \cdot \text{К}] = 0,0491 + 0,0101 \cdot (X_1 - 140)/60 + 0,0039 \cdot (X_2 - 50)/50 + 0,0001 \cdot (X_1 - 140)/60 \cdot (X_2 - 50)/50 - 0,0051 \cdot ((X_1 - 140)/60)^2 - 0,0001 \cdot ((X_2 - 50)/50)^2, \quad (21)$$

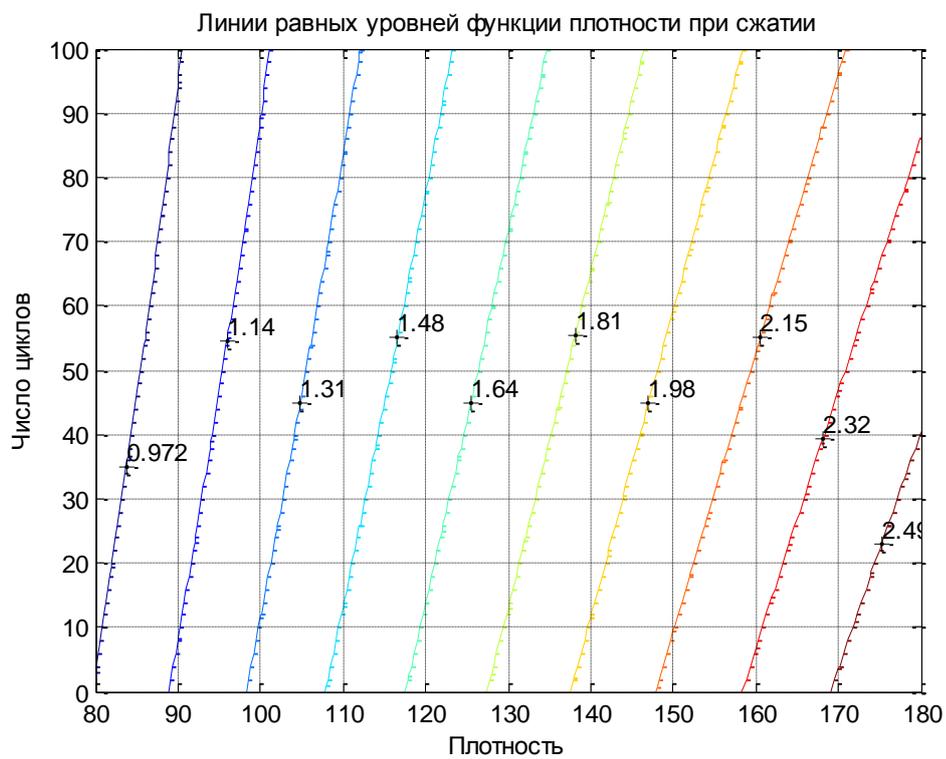
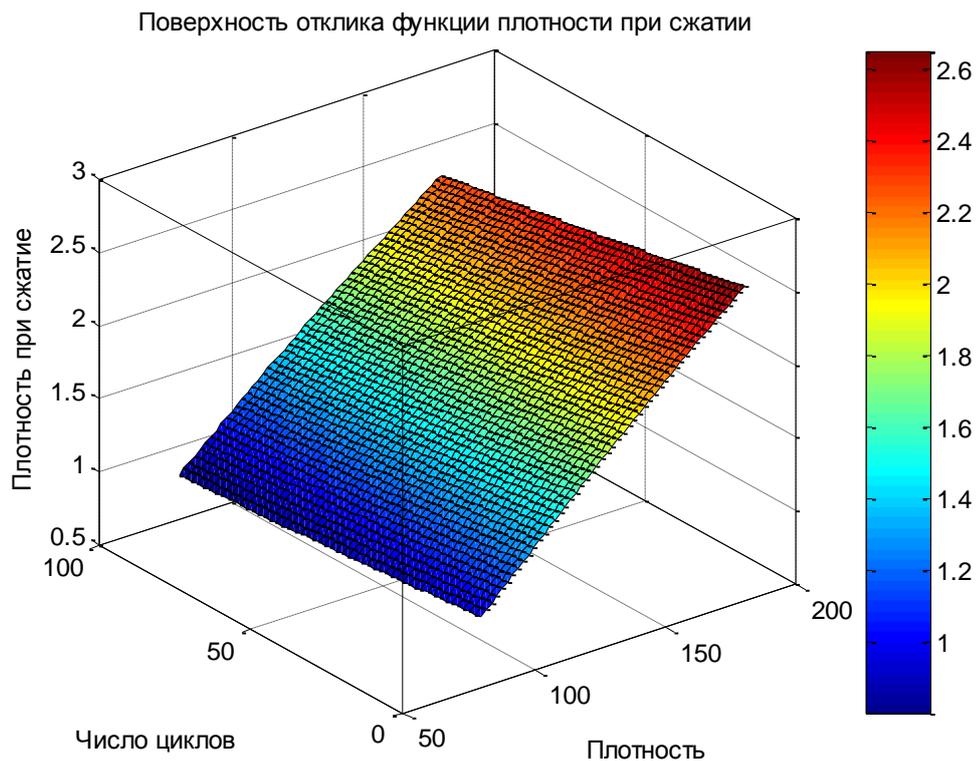
$$\sigma_{\text{сж}}, [\text{МПа}] = 1,8578 + 0,9233 \cdot (X_1 - 140)/60 - 0,1500 \cdot (X_2 - 50)/50 - 0,0625 \cdot (X_1 - 140)/60 \cdot (X_2 - 50)/50 - 0,0567 \cdot ((X_1 - 140)/60)^2 + 0,0133 \cdot ((X_2 - 50)/50)^2, \quad (22)$$

$$W_{06}, [\%] = 5,5833 - 2,733 \cdot (X_1 - 140) / 60 + 2,125 \cdot (X_2 - 50) / 50 - 0,7500 \cdot (X_1 - 140) / 60 \cdot (X_2 - 50) / 50 - 0,2000 \cdot ((X_1 - 140) / 60)^2 - 1,3250 \cdot ((X_2 - 50) / 50)^2, \quad (23)$$

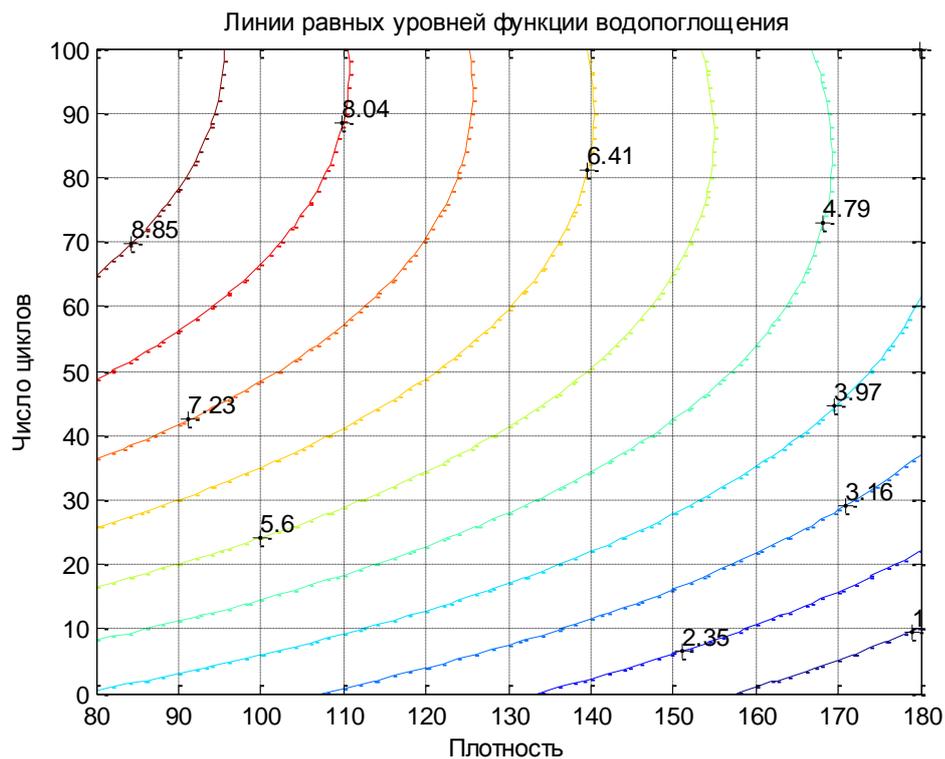
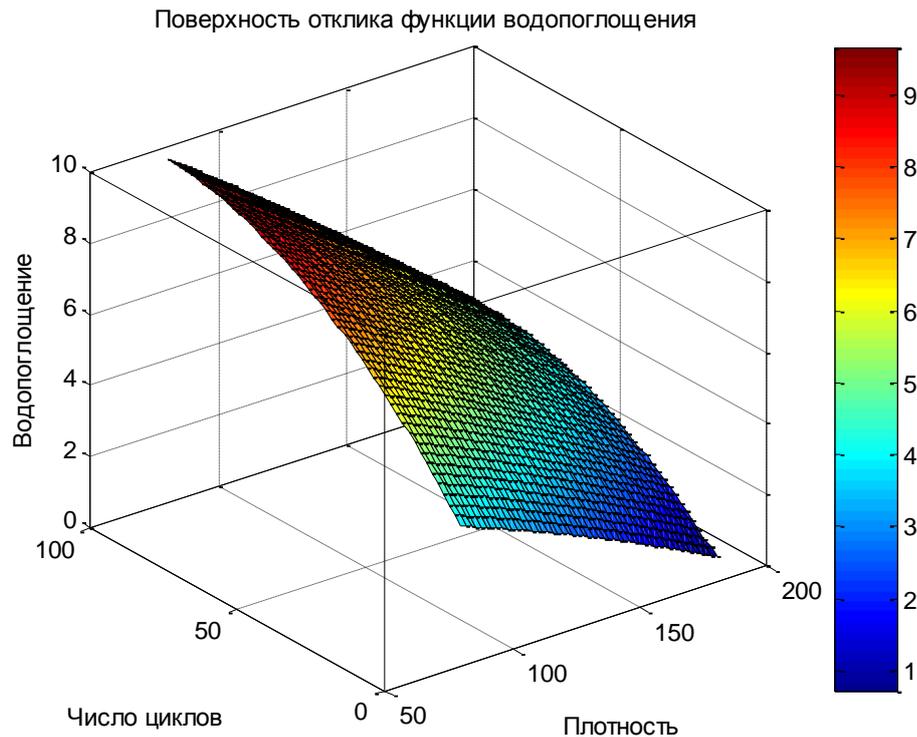
Также были построены поверхности отклика выходных параметров и графики равных уровней этих зависимостей.



(a)



(б)



(в)

Рисунок 51. Зависимость коэффициента теплопроводности (а) прочности на сжатие (б), водопоглощения (в) от кажущейся плотности и количества циклов заморозки

При проведении испытаний видимые изменения образцов (разрушение поверхности) начинает наблюдаться после 50 циклов. В тоже время, как видно из рисунков снижение эксплуатационных характеристик начинает происходить по-

сле 20 циклов. В таблице 13 представлены изменения значений в процентах, физико-механических свойств в зависимости от кажущейся плотности пеноматериала и количества циклов заморозки.

Таблица 13. Изменения физико-механических свойств пеноматериала ($\pm\%$), от количества циклов заморозки и кажущейся плотности пеноматериала.

Свойства	Плотность, кг/м ³								
	100			150			200		
	Количество циклов								
	20	30	50	20	30	50	20	30	50
Коэффициент теплопроводности	+5	+11	+14	+4	+7	+9	+2	+4	+8
Коэффициент объемного водопоглощения	+60	+200	+320	+23	+200	+315	+17	+87	+150
Прочность при сжатии	-2	-3	-4	-1	-2	-5	-3	-4	-6

Таким образом, можно констатировать, что разработанный теплоизоляционный материал на основе отходов стекла обладает эксплуатационными свойствами позволяющими рекомендовать его в качестве теплоизоляционного материала строительного назначения.

ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

На основании результатов диссертации, разработана принципиальная технология производства пеностекла пониженной плотности.

Определен технологический режим получения пеноматериала и получена оптимальная рецептура вспенивающей композиции. Для производства теплоизоляционного материала порошковым способом предложена технологическая схема состоящая из двух участков: участка производства вспенивающейся композиции и участка производства пеноблоков.

Предложенный непрерывный способ изготовления пеностекла с использованием непрерывно движущейся ленты, которая последовательно проходит стадии: загрузки, уплотнения, предварительного нагрева, вспенивания стабилизации и охлаждения. Такой способ позволяет получать пеностекло с более равномерной мелкоячеистой структурой (размер пор от 300 мкм до 1.5 мм) и формой ячеек преимущественно ориентированной перпендикулярно движению теплового потока, это способствует снижению коэффициента теплопроводности на 15-20%, так же оказывает влияние на механическую прочность пеностекла и способствует её повышению.

В разработанной методике используется тонко измельченная фракция (менее 100 мкм) стеклобой сортового листового стекла, который имеет постоянный химический состав: SiO_2 - 71,25%; Al_2O_3 - 1,87%; Fe_2O_3 - 0,29%; CaO - 8,0%; MgO - 3,25%; Na_2O - 15,64%. Полученная в процессе исследования композиция позволяет получать пеностекло, без содержания в ячейках сероводорода, с низкой плотностью, равномерной мелкоячеистой структурой, но в тоже время с высоким прочностными показателями.

Технологический схема производства показан на рисунке 52. При помощи автопогрузчика (АП) исходные компоненты со склада хранения сырья (СС) поступают на участок подготовки вспенивающейся композиции. Из бункера приемника (БП) шнековым питателем (ШП) шихта подается в шаровую вибромельницу (ШВМ) типа РВШ-400 (рис.53), где проходит процесс дробления.

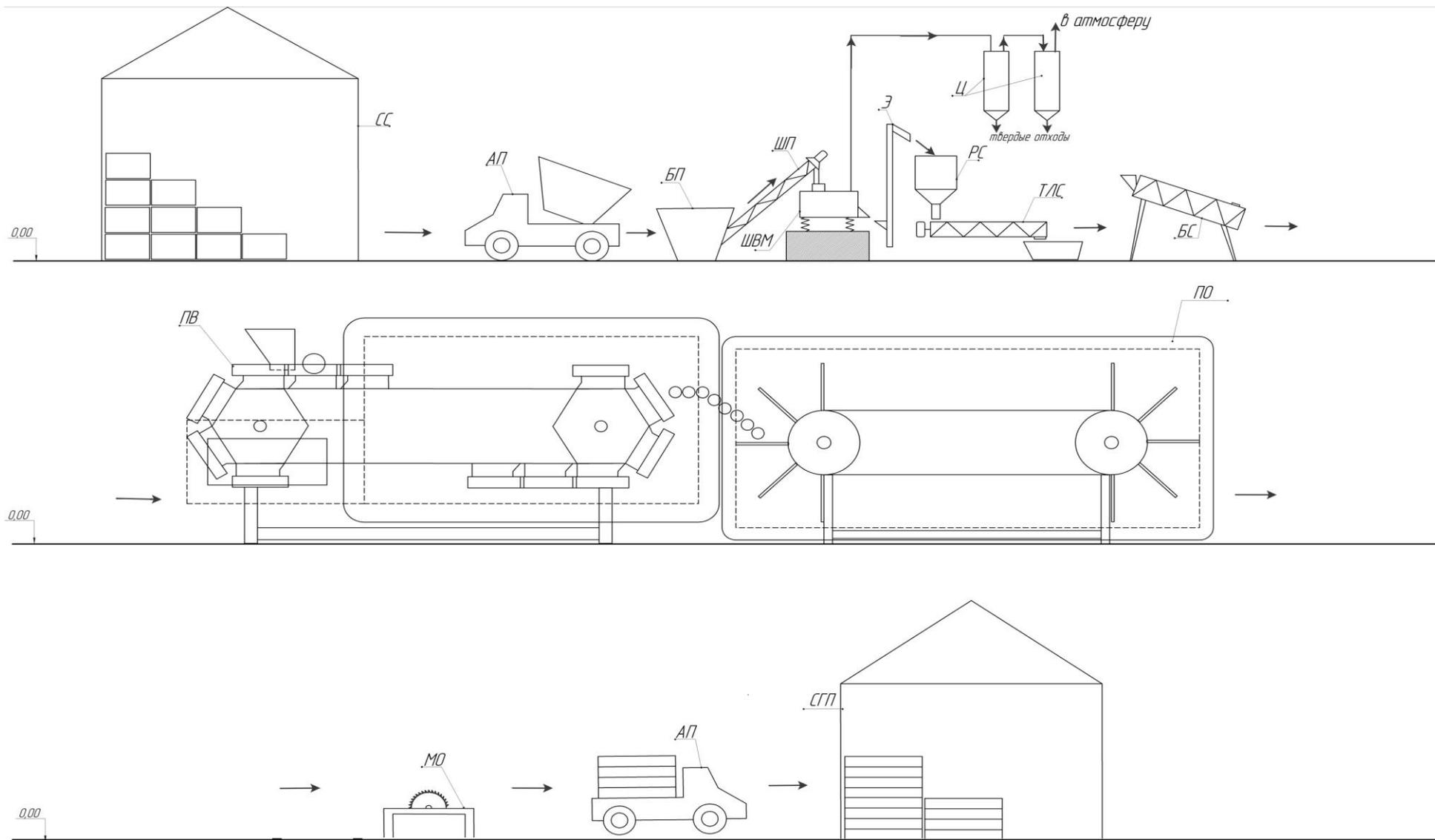


Рисунок 52 - Технологический процесс производства пеностекла

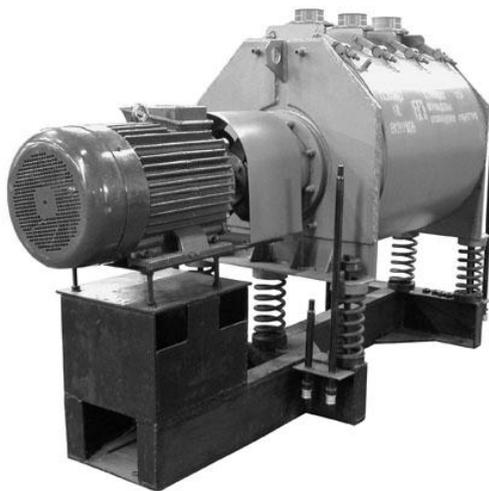


Рисунок 53 – Вибромельница РВМ-400

Параллельно с дроблением шихты происходит подготовка газообразующей смеси, путем смешения нитрата натрия с карбонатом кальция, каолином в реакторе смешения (РС).

В турболопастной смеситель (ТЛС) (рисунок 54), подается предварительно перемолотая до 60-70 мкм стеклянная шихта и газообразующая смесь, где происходит, смешение композиции и совместное доизмельчение компонентов. Наилучшие результаты при реализации изобретения могут быть получены при применении тонкомолотой стеклянной шихты с показателем удельной поверхности 4000-4500 см²/г.



Рисунок 54 – Турболопастной смеситель (ТЛС)

Приготовленный таким образом состав для получения пеностекла направляют в барабанную сушилку (БС) (рис. 55) для удаления остаточной влажности.

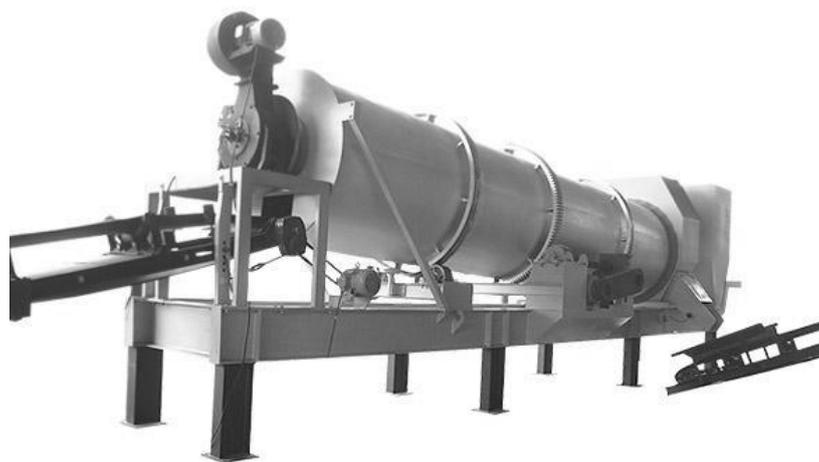


Рисунок 55 – Барабанная сушилка

Готовая вспенивающаяся композиция подается на участок производства пеноблоков к бункеру дозатору печи вспенивания (ПВ). Технологические операции нагрева, вспенивания подготовленной композиции и отжиг (охлаждение) готовых изделий производят двухстадийным способом – в печах вспенивания и отжига стекломассы. Печь вспенивания (ПВ) представляет собой печь непрерывного действия работающую на электрических нагревателях, длина которой составляет 14 метров, со скоростью движения пластинчатого транспортера 4 метра в час. Стены рабочего пространства и свод печи вспенивания изготовлены из легких каолиновых плит и матов. Данный материал отличается высокой жаростойкостью (1100-1250 °С).

Подготовленная композиция загружается в щелевой бункер дозатор, который равномерно распределяет слой композиции по непрерывно движущемуся транспортеру на заданную высоту. Непрерывно движущийся транспортер в печи вспенивания позволил создать бесконечное полотно пеностекольной ленты с одинаковой пористостью, физико-механическими показателями и заданной плотностью. Фрагменты печей вспенивания представлены на рисунке 56, 57.

Проходя через печь вспенивания отформованный слой композиции проходит стадию предварительного нагрева. Рабочая температура в зоне предварительной термической обработке составляет +400...+650 °С. Далее, уже начавший формироваться слой стекломассы поступает в зону

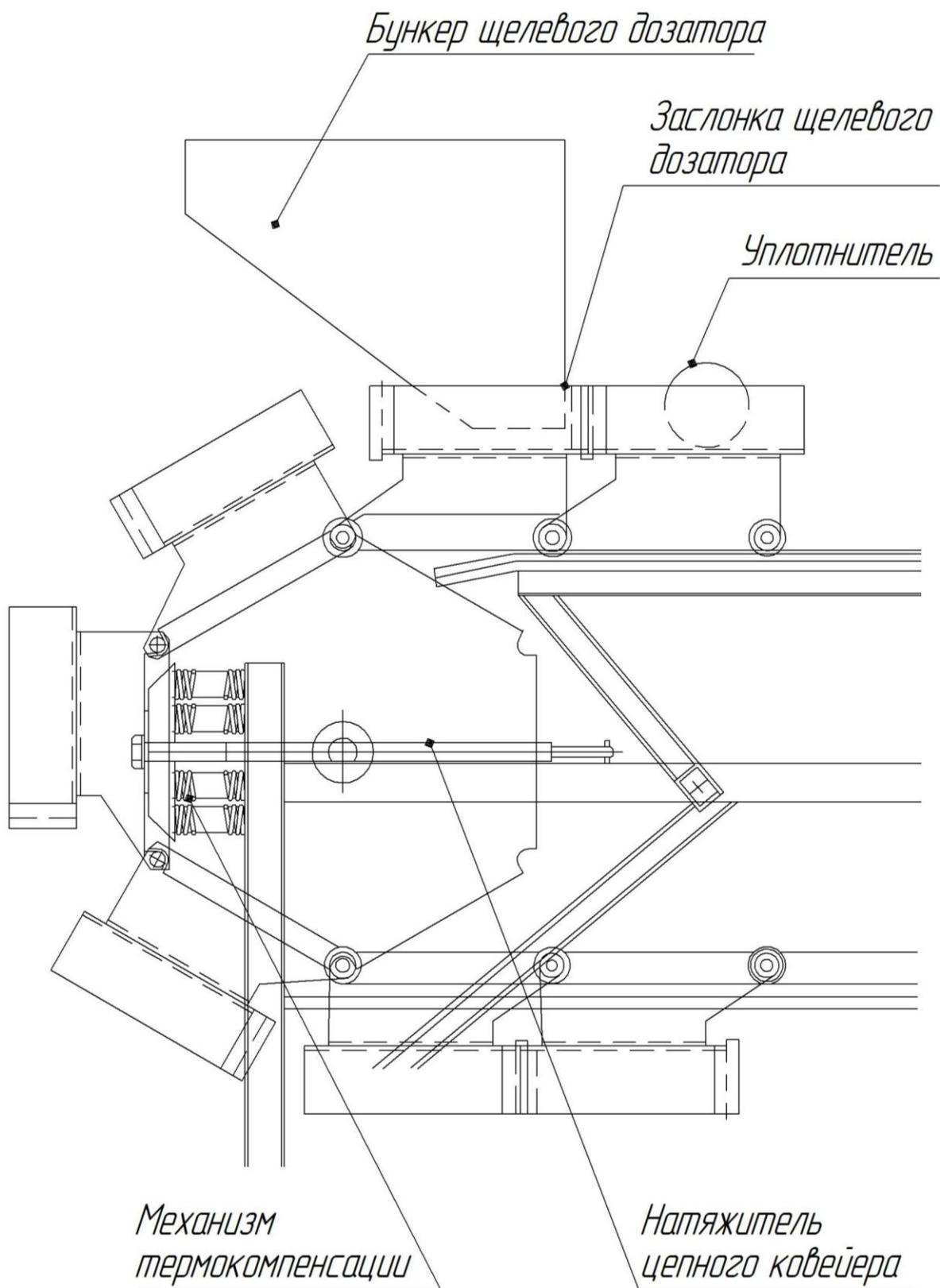


Рисунок 56. Печь вспенивания
(фрагмент рамы натяжной)

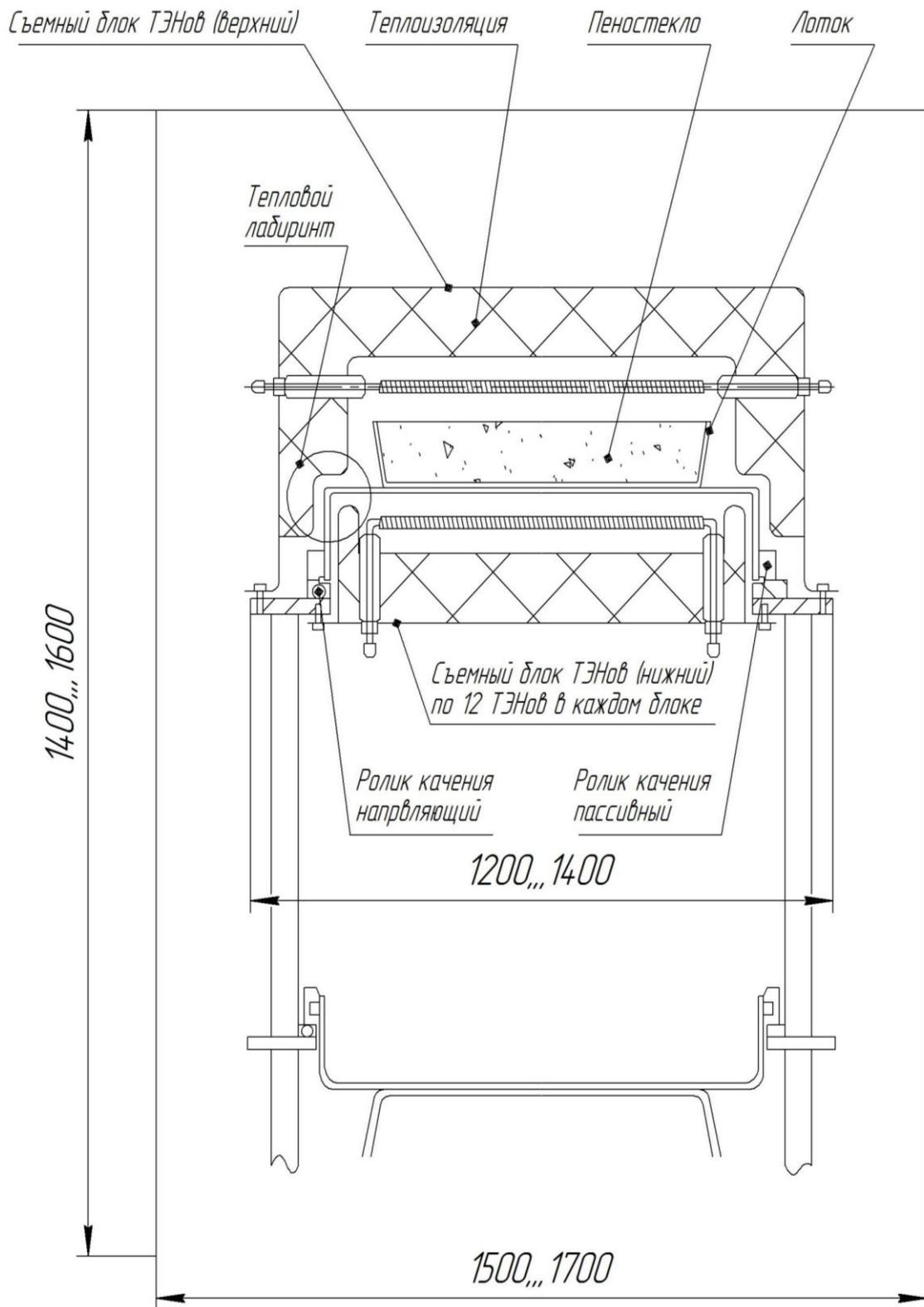


Рисунок 57. Фрагмент сечения (А-А) печи вспенивания для производства пеностекла (поперечное сечение печи)

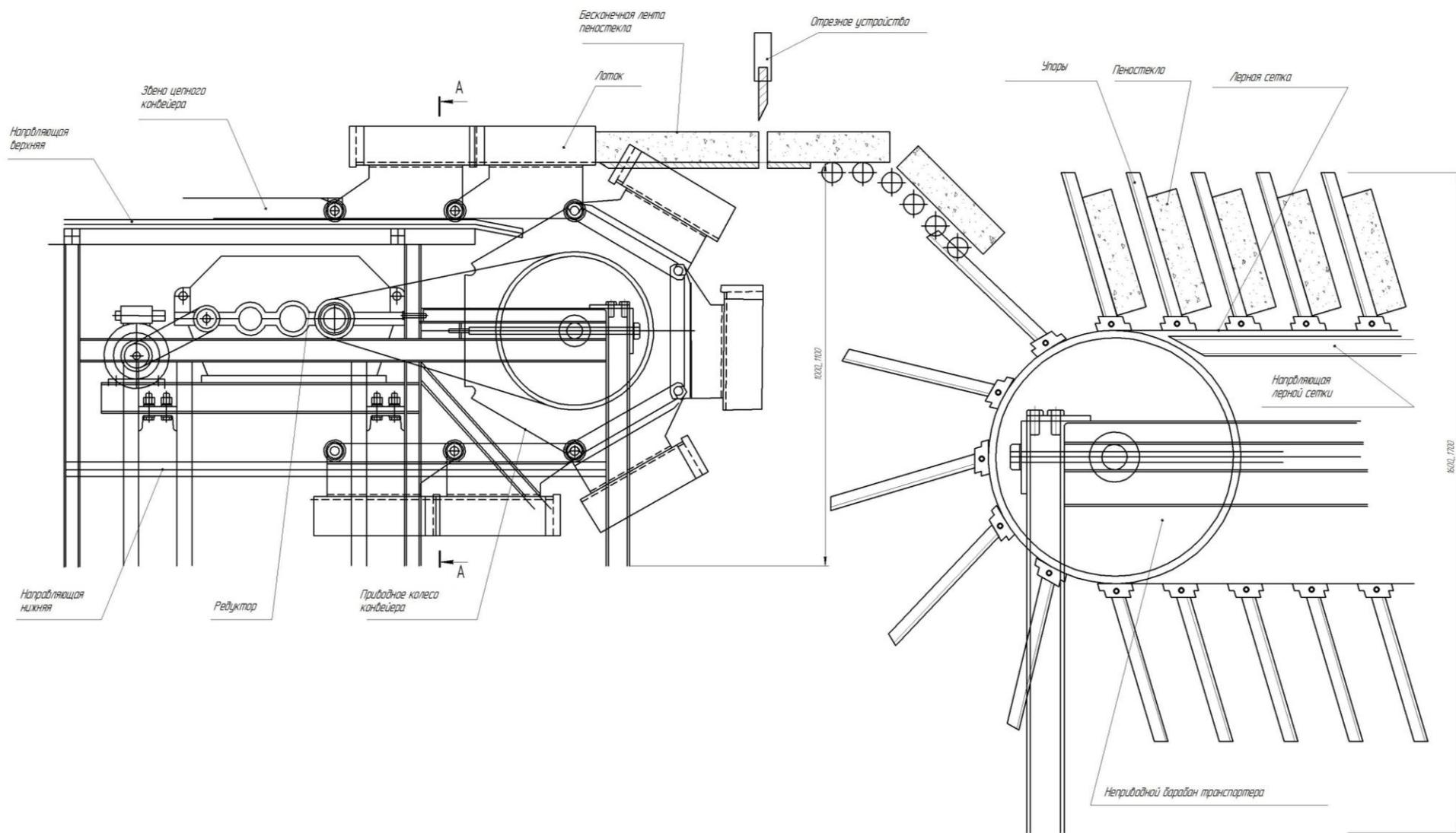


Рисунок 58. Фрагменты рамы приводной печи вспенивания и рамы печи отжига

температур, обеспечивающий получение пористой структуры стекломассы (вспенивания) с максимальным поднятием пены до 220 мм. Время пребывания стекломассы в печи вспенивания 210 минут. Температура в зоне вспенивания составляет 760 °С. На выходе из зоны вспенивания предусмотрена зона стабилизации – резкого охлаждения вспененной стекломассы на 100-110 °С с целью повышения вязкости стекла и стабилизации полученной пористой структуры.

При выходе из печи вспенивания предусмотрена операция разделения вспененного стекла от пластинчатого транспортера с последующей поперечной распиловкой ленты вспененной стекломассы на блоки. Далее при помощи устройства перекладки блоки поступают в печь отжига (ПО) (рис. 58) конвейерного типа в котором происходит постепенное охлаждение пеноматериала в течении 840-960 минут по установленному режиму. Отжиг пеностекольных блоков является ответственной стадией, производится с целью снятия остаточных внутренних напряжений в стекле. Длина печи составляет 20 метров, со скоростью движения транспортера 1,25 метра в час. Рабочая температура в печи отжига на входе - 650 °С, скорость падения температуры 0,7 °С/мин, до температуры 50 °С на выходе. Конструкция печи представляет собой леер со встроенным сетчатым конвейером. При перекладке блоки устанавливаются на сетчатый конвейер «на ребро», что способствует уменьшению общей протяженности печи отжига. Для обеспечения заданного режима отжига и усреднение температуры в печи отжига необходима принудительная циркуляция теплоносителя, что обеспечивается установкой систем циркуляции.

После выхода готовый пеноматериал поступает на механическую обработку (МО) для придания правильных геометрических форм, упаковывается и отправляется на автопогрузчике(АП) на склад готовой продукции(СГП).

Предложенная технологическая схема была реализована в условиях производства ООО «Трансполимер», г. Костерево, Владимирской области. Полученный в промышленных условиях теплоизоляционный материал, основные свойства которого, в сравнении с производимым в настоящее время материалом, представлены в таблице 14.

Таблица 14. Свойства теплоизоляционных материалов

Характеристики	Разработанное пеностекло	Пеностекло «Foamglass» США	Пеностекло «Гомельстекло» Беларусь	Пеностекло «Неопорм» Россия	Базальтовые плиты «Технониколь» Россия
Кажущаяся плотность, кг/м ³	80-150	120-250	170-190	130-160	150-200
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,035-0,05	0,04-0,1	0,048	0,047-0,052	0,05-0,06
Прочность при сжатии, МПа	1,0-3,0	0,7-4,0	< 0,7	1-2	0,025-0,03
Водопоглощение, % об., не более	1-3	2	5	<1	1-5
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,025	0	0,001	0	0,53
Верхний температурный режим эксплуатации, °С	450-550			490	250
Группа горючести	НГ				Г2
Период эксплуатации, лет	50				10-15

Как видно из таблицы разработанный материал имеет более низкий коэффициент теплопроводности, более высокую прочность и низкую плотность. Кроме того он не выделяет сероводород при эксплуатации.

На ряду с этим предложенный технологический процесс по данным ООО «Трансполимер» позволил снизить производственные потери почти в 3 раза по сравнению с аналогичными производствами, за счет уменьшения отходов при механической обработке изделия, а производительность данной линии составила 4600 м³ в год.

В настоящее время выпущено 1500 м³ пеностекла, которые были использованы рядом строительных предприятий в различных сферах строительства.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ научной и патентной литературы показал, что в строительном материаловедении накоплен большой теоретический и практический материал о теплоизоляции зданий и сооружений. Установлено, что не один из представленных материалов полностью не отвечает требованиям предъявляемым к теплоизоляционным строительным материалам, что связано с недостаточностью как теоретической так и практической проработки вопросов возникающих при получении легкого пористого материала на основе неорганического связующего, в частности практически не рассмотрен вопрос о необходимости совместимости температуры разложения газообразователя и размягчения исходного материала.
2. Разработан теплоизоляционный материал с коэффициентом теплопроводности $0,032 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и кажущейся плотностью 100 кг/м^3 , строительного назначения из отходов листового стекла, имеющий высокие конечные свойства.
3. Показано, что получение пеноматериала с минимальной плотностью возможно лишь при использовании комплексного газообразователя, состоящего из основного газообразователя (CaCO_3) и дополнительного (NaNO_3), выполняющего роль газообразователя и вещества, способного изменять температуру размягчения стекла.
4. Исследованы факторы, влияющие на свойства полученного материала. Определен состав предложенного газообразователя и его оптимальное количество. Показано что, для получения мелкоячеистой равномерной структуры в композицию необходимо вводить нуклеирующий агент, работающий при температурах $600\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$. Установлено минимальное количество каолина (4%), способного играть роль такого нуклеирующего агента.
5. Изучены физико-механических свойств полученного пеноматериала. Установлено, что пеноматериал содержит как закрытые, так и открытые ячейки. Благодаря сочетанию открытых и закрытых пор материал имеет высокую прочность как в сухом так и в водонасыщенном состоянии (разница в свойствах не более 10%) и высокую морозостойкость до 100 циклов.

6. Разработан технологический процесс получения пеностекла, в виде непрерывной ленты шириной 900 мм и толщиной 50-200 мм., позволяющий сократить на 30% количество отходов при одновременном повышении производительности, а так же снижение энергозатрат за счет снижения температуры вспенивания с 850 °С (в случае применения углеродных газообразователей) до 660 °С (для разработанной композиции).
7. Выпущена опытная партия теплоизоляционного материала, которая была использована строительными организациями при гражданском и промышленном строительстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. М.: Наука, 1968.-300с.
2. Демидович Б.К. Производство и применение пеностекла. Минск: наука и техника. – 1972.-304с.
3. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника.-1975.-248с.
4. А. С. СССР №1056894 МКИ СОЗ С11/00. Способ получения пеностекла. Кальман Тот, Иозеф Матрай, Пайом Тарьяни, Бела Тот. Оpubл. 23.11.83 Бюл.№43
5. А. С. СССР №1089069 МКИ СОЗ С11/00. Шихта для получения пенопласта. Э.Р. Саякян. Оpubл. 30.04.84 Бюл.№16
6. А, С. СССР №1654279 МКИ СОЗ С11/00. Способ получения декоративно-облицовочных плит. А.А. Григорян, Г.С. Мелконян, Ю.Г. Игитхянян. Оpubл. 07.06.91 Бюл.№21
7. А. С. СССР №1359259 МКИ СОЗ С11/00. Пеностекло и способ его получения. Э.Р. Саякян. Оpubл. 15.12.87.
8. А.С. СССР №1073199 МКИ СОЗ С11/00. Смесь для изготовления пеностекла. Э.Р, Саякян, И.В. Месронян, А.С. Даниелян. Оpubл. 15.02.84 Бюл.№6
9. А. С. СССР №1265161 МКИ СОЗ С11/00. Состав для получения пористых гранул. Э.Р. Саякян, М.Г. Бадалян, А.С. Даниелян, Н.В. Месронян. Оpubл. 23.10.86 Бюл.№39
- 10.А. С. СССР №1318565 МКИ СОЗ С11/00. Сырьевая смесь для гранулированного пеностекла. А.И. Сипливый, Г.Н. Пименов. Оpubл. 23.06.87 Бюл.№23
- 11.Патент РФ №2051869 МКИ СОЗ С11/00. Шихта для получения пеностекла. А.К. Казанцев, И.А. Белицкий, Н.Г. Васильева, А.В. Горбунов, Б.А. Фурсенко. Оpubл. 10.01.96
- 12.А. С. СССР №1470692 МКИ СОЗ С11/00. Состав для получения пористых гранул. Э.Р. Саякян, С.А. Даниелян, Э.А. Госинян, Р.Н. Язычян, Л.Э. Казарян. Оpubл. 07.04.89 Бюл.№3/13

13. А. С. СССР №1571014 МКИ С03 С11/10. Способ получения пенотуфа. А.Л. Григорян, Г.С. Мелконян, А.А. Саркисян, А.С.Григорян. Оpubл. 15.06.90 Бюл.№22
14. А.С. СССР №1571015 МКИ С03 С11/00. Способ получения пеностекла. А.А. Григорян, Г.С. Мелконян, А.А. Саркисян. Оpubл. 15.06.90 Бюл.№22.
15. А.С. СССР №1640129 МКИ С03 С11/00. Способ получения пористых гранул. А.А. Григорян, Г.С. Мелконян, А.А. Саркисян. Оpubл. 07.04.91 Бюл.№13
16. А.С. СССР №1805109 МКИ С03 С11/00. Способ получения гранулированного ячеистого материала. Э.Р. Саякян, Г.Г. Бабаян, В.Г. Михаэлян, Р.Н. Язычян, Р.Р.Саякян. Оpubл. 30.03.93 Бюл.№12
17. Патент РФ №2326841 С03 С11/00. Способ получения гранулята для производства пеностекла и пеностеклокристаллических материалов. А.Н. Абияка, В.И. Верещагин, О.В. Казымина. Оpubл. 20.06.2008.
18. Патент РФ №2114797. МКИ С03 С11/00. Способ получения пористых стекломатериалов из металлургических шлаков. В.Ф. Павлов, С.Г. Баянин, В.Ф. Шабанов. Оpubл. 10.07.98.
19. Патент РФ №2315019. Шихта для получения пенодиатомитовых изделий. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 20.01.2008.
20. Патент РФ №2313500. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 27.12.2007.
21. Патент РФ №2315734. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 27.01.2008.
22. Патент РФ №2325361. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 27.05.2008.
23. Патент РФ №2335474. Сырьевая смесь для изготовления пеностекла. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 10.10.2008.
24. Патент РФ №2336237. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 20.10.2008.
25. Патент РФ №2336237. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 20.06.2009.
26. Патент РФ №2354617. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 10.05.2009.
27. Патент РФ №2356862. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 27.05.2009.
28. Патент РФ №2361828. Способ изготовления пеностекла.. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 20.07.2009.

29. Патент РФ №2358927. Сырьевая смесь для изготовления пеностекла. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 20.06.2009.
30. Патент РФ №2346901. Ячеистое стекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 20.02.2009.
31. Патент РФ №2318760. Пеностекло. Ю.А. Щепочкина. Оpubл. 10.03.2008.
32. Патент РФ №2351554. Способ получения пеностекла. М.Л. Катков, Е.А. Решетников, В.Н. Гребенников. Оpubл. 10.04.2009.
33. Патент РФ №2187473. Способ получения блочного пеностекла. С.А. Суворов, А.П. Шевчин, В.С. Можегов, Ли Чы-Тай кл 7С03В 19/08, С03 С11/00, опубл. 20.08.2002 бюл. №23.
34. Патент РФ №2167112. Способ получения пеностекла. А.А. Кетов, И.С. Пузанов, М.П. Пьянков, Д.В. Саулин, кл. 7С03 С11/00, С03В 19/08, опубл. 20.05.2001, бюл. №14.
35. Патент РФ №2255059. Способ получения пеностекла. В.З. Леонидов, М.П. Дудко, А.А. Зиновьев, кл. 7С03 С11/00, С03В 19/08, опубл. 27.06.2005. бюл. №18.
36. Патент РФ №2297398. Способ получения блоков пеносиликата. А.В. Степанов, С.Б. Данилов, А.А. Степанов. С03 С11/00 Оpubл. 20.04.2007. бюл. №11.
37. Патент РФ №2290372. Способ производства теплоизоляционного блочного пеностекла. В.И. Наумов, Ю.И. Наумов. Оpubл. 27.12.2006.
38. Патент РФ №2237031. Способ производства теплоизоляционного блочного пеностекла. В.И. Наумов, Ю.И. Наумов. Оpubл. 27.09.2004.
39. Патент РФ №2357933. Шихта для получения пеностекла. С03 С11/00 С2. А.А. Архипов, В.А. Потов, В.В. Власов. Оpubл. 10.06.2009.
40. Патент США №5516351, С03 В 19/06. Оpubл. 14.05.1996.
41. Патент США №3151966, кл. 65-22 Оpubл. 06.10.1964.
42. Ю.А. Гулюян, О.А. Голозубов. «Справочник молодого рабочего по производству и обработке стекла и стеклоизделий». М.: Высшая школа, 1989.-с.64.
43. Номер международной заявки РСТ/RU2007/000014. Номер международной публикации WO2007/089170 А1. Способ изготовления долговечных водоне-

- проницаемых пеностекла и пенопластмасс. Д.А.Климов, Е.А.Климов, Т.В.Климова. Оpubл. 09.08.2007.
44. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А., Технология теплоизоляционных материалов. М.: Стройиздат.- 1980.- 399с.
45. Китайгородский А.А. Технология стекла. М.: ГИС. -1961.-612с.
46. Аппен А.А. Химия стекла. Ленинград: Изд. Химия. -1974.- 352с.
47. Справочник по производству стекла. М.:Госсройиздат. -1963.-1022с.
48. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и силикатов. М.: Стройиздат. -1973.- 431с.
49. Шилл Ф. Пеностекло.-М.: Стройиздат.-1965.-307с.
50. Шелби Дж. Структура, свойств и технология стекла: пер. с Англ. Медведева Е.Ф. М.: Мир.-2006.- 288с.
51. Орлов Д.Л. Пеностекло-эффективный теплоизоляционный материал. Стекло мира.-1999.№4. –с. 66-68
52. А.С. 1616866 СССР, МКИ С 03 С 11/00. Композиция для получения пористого гранул./ Григорян А.А., Г.С. Мелконян, А.А. Саркисян. Оpubл. 30.03.93 Бюл.№12.
53. А.С. 1211235 СССР, МКИ С 03 С 11/00. Способ получения пеношлакостекла/ Козьмин М.И. Оpubл. 15.05.72, Бюл. №15
54. А.С. 1169952 СССР, МКИ С 03 С 11/00. Способ получения пеностекла/ Роговой М.И., Волочиенко Л.И., Ванин А.Я. Оpubл. 15.09.82, Бюл. №34.
55. А.С. 958362 СССР, МКИ С 03 С 11/00. Способ приготовления гранулированного пеностекла/ Григорян А.А., Г.С. Мелконян, Элиазян Л.А. Оpubл. 15.08.91 Бюл. №30
56. Зайцева Е.И. Поризованный теплоизоляционный материал на основе стеклобоя: Автореферат дисс. ...канд. Техн. Наук, М., 1998. -22с.
57. Румянцев Б.М., Зайцева Е.И. Получение теплоизоляционных материалов из стеклобоя// Изв. вузов. Строительство. -2002. №8.–С.24-27.
58. Румянцев Б.М., Зайцев Е.И. Получение теплоизоляционных материалов из стеклобоя// Изв. вузов Строительство. -2002. №8. –С.24-27.

59. Саакян Э.Р., Акопян Г.Г. Пеностекло из перлита // Промышленность Армении. -1977. №6.-С.36-38.
60. Саакян Э.Р., Бадалян М.Г., Даниелян А.С. Пеногранулят из перлитовых пород//Стекло и керамика.-1990. №2. –С.7.
61. Саакян Э.Р. Ячеистое стекло и гранулят из забайкальского перлитового сырья// Стекло и керамика.-1990.№2-С.7.
62. Саакян Э.Р., Акропян Г.Г. Пеностекло из вулканических стекол//Тез. Докл. «Легкие заполнители и теплоизоляционные материалы в современном строительстве».-Киев, 1975.-С.27.
63. Бутт Л.М., Михайлова-Богданская З., Артаманова Н. и др.// Научно-технические основы стекловарения: Сбор. Науч. Тр./Гос. НИИ стекла.-М.:ГИС,1980.-С.112-118.
64. Бутт Л.М., Поляк В.В. Технология стекла.-М.: Изд-во лит по строительству, 1971.-368с.
65. Садченко Н.П. Исследование в области получения пеностекла для низкотемпературных изоляций: Автореферат дисс. ... канд. техн. Наук. Минск 1973.
66. Крупа А.А. Физико-химические основы получения пористых материалов из вулканических стекол. Киев: Высшая школа, 1978.-136с.
67. Будников П.П. Химия и технология силикатов.-Киев: Наукова думка, 1964.-612с.
68. А.С. 1033465 СССР, МКИ С 03 С11/00, Способ получения гранулированного пеностекла/ Демидович Б.К.,Новиков Е.С., Иодо С.С., Петрович В.А. Опубл. 07.08.83, Бюл.№29
69. Саакян Э.Р. Новые искусственные ячеистые материалы, легкие заполнители и изделия на их основе: Автореферат дисс. М., 1992.-22с.
70. Зайцев А.Г. Эксплуатационная долговечность полимерных строительных материалов в сборном домостроении –М.: Изд-во по строительству, 1972.-167с.
71. Попов В.В. Материалы для теплоизоляционных работ.-М.: Высшая школа, 1988.-151с.

72. Белоусов Ю.Л., Алексеев С.В. Устойчивость пеностекла на контакте с цементным раствором// Строительные материалы.-1999. №7-8. –С. 45-47.
73. ГОСТ 25485-89. бетоны ячеистые. Технические условия. Введ. 01.01.90.-М.: Изд-во стандартов, 1989. УДК 666.973.6:006.354. Группа Ж13
74. ГОСТ 5742-76. Изделия из ячеистых бетонов теплоизоляционные. – Взамен ГОСТ 5743-61.Введ. 01.01.77. – М.: Изд-во стандартов, 1976. УДК 662.998.3:691.327-41(083-74). Группа Ж15.
75. Горяйнов К. Э., Горяйнова С. К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. – М.: Стройиздат, 1982.-376 с.
76. Майзель И. Л., Сандлер В. Г. Технология теплоизоляционных материалов. – М.: Высшая школа, 1988. - 238 с.
77. Нагибин Г. В., Павлов В. Ф., Эллерн М. А. Технология теплоизоляционных и гипсовых материалов. – М.: Высшая школа, 1966. - 467 с.
78. Павлов Н. И. Строительная керамика и пеностекло. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1966.-188 с.
79. Китайгородский И. И. и др. // Стекло и керамика. – 1959. № 12. – С.20-21.
80. Бутт Ю. М., Дудеров Г. Н., Матвеев М. А. Общая технология силикатов. - М.: Государственное изд-во лит. по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 463 с.
81. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий / Госстрой России., - М.: ФГУП ЦПП, 2004, - 26 с.
82. Павлов В. А. Пенополистирол. – М.: Химия, 1973. - 239 с.
83. Пожарная опасность строительных материалов // Под ред. А. Н. Баратова. М.: Стройиздат, 1972. – 320 с.
84. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Полимерные теплоизоляционные материалы. –М.: Стройиздат, 1972. - 320с.
85. Филатов И. С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. – М.: Наука, 1983. – 216 с.

86. Ясин Ю. Д., Ясин В. Ю., Ли А. В. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций // Строительные материалы. – 2002. №5. – С. 33-35.
87. Бобров Ю. Л. Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов. – М.: Стройиздат, 1987. – 163 с.
88. Барановский И. В. Использование отходов стекла в производстве облицовочных материалов. // Новые материалы на основе стекла для строительства: Сб. науч. тр. / Гос. НИИ стекла. – М.: ГИС, 1989. – С. 77-80.
89. Быков А. С. Стеклокремнезит. Технология и применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1994. – 253 с.
90. Орлова Л. А., Спиридонов Ю. А. Строительные стеклокристаллические материалы // Строительные материалы. – 2000. №6. – С. 17-20
91. Алексеева Т. М., Колосова М. М. Стедокристаллический материал на основе отходов промышленности и минерального сырья. // Новые материалы на основе стекла для строительства: Сб. науч. тр. / Гос. НИИ стекла. – М.: ГИС, 1989. – С. 85-86.
92. Павлова Н. А., Павлов И. В., Павлов В. Ф. и др. Стабилизация состава техногенного сырья с целью получения пеносиликата // строительные материалы. – 2001. - № 6. С. 14-15.
93. www.penosytal.ru – сайт компании «Пеноситал»
94. www.gomelglass.ru – сайт компании «Гомельстекло»
95. www.foamglas.ru – сайт компании «Foamglas»
96. www.sgag.de – сайт компании «Schaumglas-Schotter»
97. www.rospenosteklo.ru – сайт компании «Трансполимер»
98. www.rsl.ru – Российская государственная библиотека
99. www.rgost.ru – сайт с базами ГОСТ.
100. www.know-house.ru – сайт с базами СНиП и ГОСТ
101. Берлин А. А., Шутов Ф. А. / Пенополимеры на основе реакционно- способных олигомеров. М.: Химия, 1978. - 296 с.

102. Берлин А. А., Шутов Ф. А. / Химия и технология газонаполненных высокополимеров. М.: Химия, 1980. - 504 с.
103. Федосов С.В. Математическая модель динамики процесса порообразования при термической обработке пеностекольной шихты / С.В. Федосов, М.О. Баканов, А.В. Волков, А.И. Сокольский, Ю.А. Щепочкина// Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. -2014.-Т.57.-вып.3. – С. 73-79
104. Федосов С.В. Особенности получения композиционного строительного материала на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием/ С.В. Федосов, Ю.А. Щепочкина, М.О. Баканов// Строительство и реконструкция.- 2013.-№3 (47). –С. 77-80
105. Федосов С.В. Композиционный материал на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием/ С.В. Федосов, Ю.А. Щепочкина, М.О. Баканов// Строительство и реконструкция. -2012.№6(44). –С.109-114.
106. Соков В.Н., Создание теплоизоляционных материалов в электрогидротеплосиловом поле.// Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет: Москва, 2013. - 316 с.
107. Береговой В.А., Сорокин Д.С., Пеностекло на основе кремнистых опок.// Образование и наука в современном строительстве. Инновации. №5 2016. С. 157-163.
108. Береговой В.А., Сорокин Д.С., Закономерности формирования структуры пеноминеральных систем при производстве ячеистых строительных материалов.// Молодой ученый. №9 (89) 2015. С. 305-308
109. Соков В.Н., Логунин А.Ю., Егорова А.А. Производство эффективных строительных материалов на основе отходов стеклобоя и полистирола как решение проблемы ТБО.// Проблемы теории и практики современной науки. Материалы Международной научно-практической конференции. РИО ООО «Наука и образование» 2015. С. 39-40.
110. Соков В.Н., Солнцев А.А., Лямзин Ф.М. Технология бесшамотного высокотемпературного теплоизоляционного материала.//Молодые ученые. №11 2016. С. 835-839.

111. Береговой В.А., Костин Д.С., Береговой А.М. Теплоизоляционная газостеклокерамика на основе кремнистых горных пород.//Известия высших учебных заведений. Строительство.№10 (648) 2011. С. 43-50.
112. Бартенев, Г. М. Строение и механические свойства неорганических стекол / Г. М. Бартенев. – М.: Издательство литературы по строительству, 1966. – 216с.