

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-8-22

Грушко И.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
E-mail: grushkois@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕНОСТЕКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. Повышение прочности пеностекла до значений, достаточных для использования его не только как теплоизоляционного, но и конструкционного материала, позволит значимо расширить область его применения и снизить материалоемкость строительства. Решение возможно за счет формирования управляемой и прогнозируемой гетерогенной аморфно-кристаллической структуры. Влияние кристаллической фазы на структуру и прочность пеностекла противоречиво и требует значимого внимания. Одновременно необходимо учитывать уже полученные результаты исследований по снижению стоимости материала за счет использования отходов. Однако, состав отходов различных захоронений варьируется, поэтому необходима универсальная методология разработки материалов. Предложена единая методология, позволяющая решать задачу проектирования новых материалов при использовании отходов различного состава, особое внимание в которой уделено задаче синтеза исходной шихты и температурно-временного режима синтеза пеностекла. Для подтверждения предложенной методологии выполнена разработка материала на примере золошлаковой смеси ТЭС в г. Новочеркасске. Полученные образцы пеностекла и результаты исследования использованы для установления особенностей процессов формирования микроструктуры пеностекла методом регрессионного анализа.

Ключевые слова: пеностекло, кристаллическая фаза, физико-химическое моделирование, инициатор кристаллизации, модификатор

Введение. Пеностекло характеризуется низкими значениями коэффициента теплопроводности, а также высокими звукоизолирующими характеристиками. Стабильность геометрических форм изделия позволяет использовать пеностекло для изоляции различных объектов строительства, а также промышленного оборудования, исключая плановые ремонты. Можно рассматривать в качестве примера монтаж пеностекла в составе теплоизоляционных конструкций: стены с отделкой тяжелой облицовкой, традиционной штукатуркой, из металлического профилированного листа, с отделочным слоем из облицовочного кирпича, а также рулонная кровля по железобетонному основанию, по профилированному листу, эксплуатируемая кровля, металлическая кровля по профилированному листу [1, 2].

Поскольку пеностекло не воспламеняется и не горит, а также инертно в агрессивных средах, его использование при теплоизоляции трубопроводов, использующихся для транспортировки нефти и газа, показало высокую эффективность [3].

Увеличение значений прочностных характеристик пеностекла дает возможность расширения возможностей его применения в том числе как теплоизоляционно-конструкционного.

Прочностные характеристики определяются структурой пеностекла. Твердая фаза пеностекла

традиционно представлена стеклом. Влияние процесса кристаллизации на формирование структуры пеностекла и его эксплуатационные характеристики изучено не в достаточной степени. Наличие кристаллов определенных параметров в процессе термообработки шихты не создает препятствий формированию структуры с равномерной закрытой пористостью. В то же время кристаллизация стекла рассматривается и как отрицательное явление, тормозящее плавное и равномерное вспенивание. Совокупность факторов кристаллизации в пеностекле представлена на рисунке 1.

Если рассматривать межпоровую перегородку пеностекла, содержащую аморфную и кристаллическую фазы, то с физической точки зрения граница раздела этих фаз может быть источником напряжения, который при оказании воздействия приведет к разрушению материала. Однако, если величина кристаллических фаз будет находиться в допустимых пределах, то кристаллические включения армируют межпоровую перегородку и значения прочностных свойств пеностекла возрастают.

Учет микроструктуры, несомненно, является важной задачей в проектировании пеностекла повышенной прочности, однако, одновременно необходимо соблюдать существующие тенден-

ции к снижению стоимости продукта. Многочисленными исследованиями доказано, что снижение стоимости пеностекла возможно за счет использования вторичного минерального сырья [4, 5]. Одновременно это решает важную проблему утилизации промышленных отходов. Важной

научной проблемой при этом является не сама по себе разработка нового материала, а обобщение и определение методологии разработки таковых. Разрешение данной проблемы позволит решать задачу проектирования новых материалов при использовании отходов различного состава.



Рис. 1. Факторы процесса кристаллизации

По результатам проведенного обзора по проблеме исследований [6, 7] сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что применение золошлаковых отходов в качестве основного компонента шихты (65–70 %) для производства пеностекла снижает себестоимость на 25–30 % благодаря снижению затрат на сырье и эффективной утилизации отходов. Это обусловлено низкой стоимостью золошлаковых отходов, что позволяет сократить финансовые издержки. Использование данных отходов соответствует требованиям устойчивого развития, уменьшает экологический след и снижает нагрузку на полигоны с отходами.

2. Выявлено, что оптимальное соотношение аморфной и кристаллической фаз в пеностекле, равное 60:40, является наиболее эффективным для достижения требуемых эксплуатационных характеристик материала. Данное соотношение обеспечивает высокие теплоизоляционные свойства с коэффициентом теплопроводности 0,06–0,08 Вт/м·К, что позволяет эффективно поддерживать температурный режим. Увеличенное содержание аморфной фазы способствует формированию однородной структуры, что в свою очередь повышает механическую прочность, достигающую 1,8–2,2 МПа.

3. Установлено, что введение 2–3 % наноразмерных добавок, таких как SiO_2 или Al_2O_3 , в шихту приводит к увеличению механической прочности на 15–20 % при минимальном воздействии на теплоизоляционные свойства. Данная закономерность обоснована эффектом тонкослойного покрытия наноразмерных частиц, что способствует улучшению адгезионной связи

между кристаллическими включениями основного компонента. Наночастицы, обладая значительной энергией границы раздела и проявляя эффективные взаимодействия с матрицей, формируют дополнительные межфазные границы, что, в свою очередь, увеличивает прочностные характеристики и препятствует образованию дефектов. Сохранение теплоизоляционных свойств при введении наноразмерных добавок связано с отсутствием значительных изменений в микроструктуре, что позволяет сохранить низкие коэффициенты теплопроводности.

4. Установлено, что формирование кристаллической фазы в виде игольчатых кристаллов диоксида размером 5–10 мкм играет ключевую роль в повышении механической прочности пеностекла. Данные кристаллы обеспечивают высокую степень армирования межпоровых перегородок благодаря удлиненной форме и прочности. Их размеры оптимальны для эффективного заполнения пор, что усиливает сцепление между зернами и улучшает распределение нагрузки. Это приводит к увеличению прочности на 15–20 %, так как повышается жесткость материала и снижается вероятность трещинообразования под механическими воздействиями. Наличие игольчатых структур создает структурную связь, препятствуя смещению частиц и повышая устойчивость к внешним нагрузкам.

5. Выявлено, что оптимальный температурный режим вспенивания и кристаллизации, находящийся в диапазоне 850–900 °С с выдержкой 15–20 минут, обусловлен термодинамическими и кинетическими процессами, протекающими в шихте. При данной температуре происходит интенсивное термическое разложение компонентов

шихты, что способствует активации диффузии газов и образованию структурно изоморфной матрицы. В этом диапазоне температур достигается высокая степень метастабильного состояния системы и однородное распределение компонентов в объеме формы, позволяющее формироваться пористой структуре с размерами пор 0,5–2,0 мм. Данные размеры обеспечивают оптимальное соотношение между механической прочностью и малой плотностью материала.

6. Установлено, что пеностекло, полученное из техногенного сырья, характеризуется высокой морозостойкостью (F100) и низким водопоглощением (не более 2 % по массе). Высокая морозостойкость является следствием его ячеистой структуры, что обеспечивает равномерное распределение механических напряжений и минимизирует риск формирования трещин в условиях циклического замораживания и оттаивания. Низкое водопоглощение достигается благодаря замкнутой пористой структуре, формируемой в процессе вспенивания. Данная структура препятствует проникновению влаги, что предотвращает ее расширение при замерзании внутри материала.

На основании анализа современного состояния теории и практики в области структурообразования пеностекла выдвинута следующая научная гипотеза: управление прочностными свойствами пеностекла возможно путем создания гетерогенной структуры, включающей кристаллические фазы определенных параметров.

Целью работы является комплексное решение крупной научной проблемы по разработке методологии прогнозирования эксплуатационных свойств пеностекла на основе вторичных сырьевых материалов – продуктов сжигания угля.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

1. Изучение физико-химических закономерностей получения пеностекла для корректировки и прогнозирования процессов, активизирующихся при формировании их структуры с учетом использования техногенных сырьевых материалов, таких как золошлаковые отходы.

2. Определение оптимального состава сырьевой смеси и режимов термообработки для установления наиболее эффективных условий получения пеностекла с требуемыми эксплуатационными свойствами.

3. Изучение влияния химического состава и дисперсности компонентов сырьевой смеси для определения зависимостей их влияния на пористую структуру и процессы кристаллизации в пеностекле.

4. Разработка математической модели процесса получения пеностекла для прогнозирования его свойств, в качестве входных параметров которой, в том числе, выступают химический состав сырьевых компонентов и данные температурно-временного режима синтеза.

5. Исследование механизма формирования кристаллической фазы в пеностекле и его влияние на физико-механические свойства готовой продукции.

6. Разработка технологии получения пеностекла при использовании техногенного сырья и одностадийного режима термообработки.

7. Разработка комплексной методологии исследования, включающей физико-химическое моделирование и методы исследования структуры, неразрушающий и разрушающий контроль, с целью комплексного исследования процессов структурообразования.

8. Изучение влияния технологических добавок на структуру и эксплуатационные свойства пеностекла в процессе температурной обработки.

9. Разработка научно обоснованных рекомендаций по оптимизации технологических параметров производства, которые обеспечат снижение энергозатрат и себестоимости производства.

Материалы и методы. Методология представлена в виде схемы на рисунке 2. Часть из указанных выше задач эффективно решается хорошо зарекомендовавшими себя методами. Структурно-методологическая схема исследований представлена на рисунке 3.

Основопологающей является задача получения исходных данных о вторичном минеральном сырье, так как ее результаты используются для установления оптимальных условий использования для синтеза пеностекла с использованием современных методов анализа. Для реализации данной задачи необходима полная информация о свойствах золошлаковых отходов ТЭС. Методология комплексного исследования золошлаковой смеси ТЭС должна включать в себя следующее. Для определения активности естественных радионуклидов золошлаковой смеси требуется санитарно-эпидемиологическая экспертиза в соответствии с Едиными санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). Определение основных элементов золошлаковой смеси проводится методом рентгено-флуоресцентного анализа, фазово-минералогический анализ выполнен методом рентгеновской дифракции [8, 9]. Термические свойства золошлаковой смеси исследуются методом синхронного термического анализа

(СТА) в инертной атмосфере (Ar) с одновременной регистрацией кривых термогравиметрии

(ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) [10].

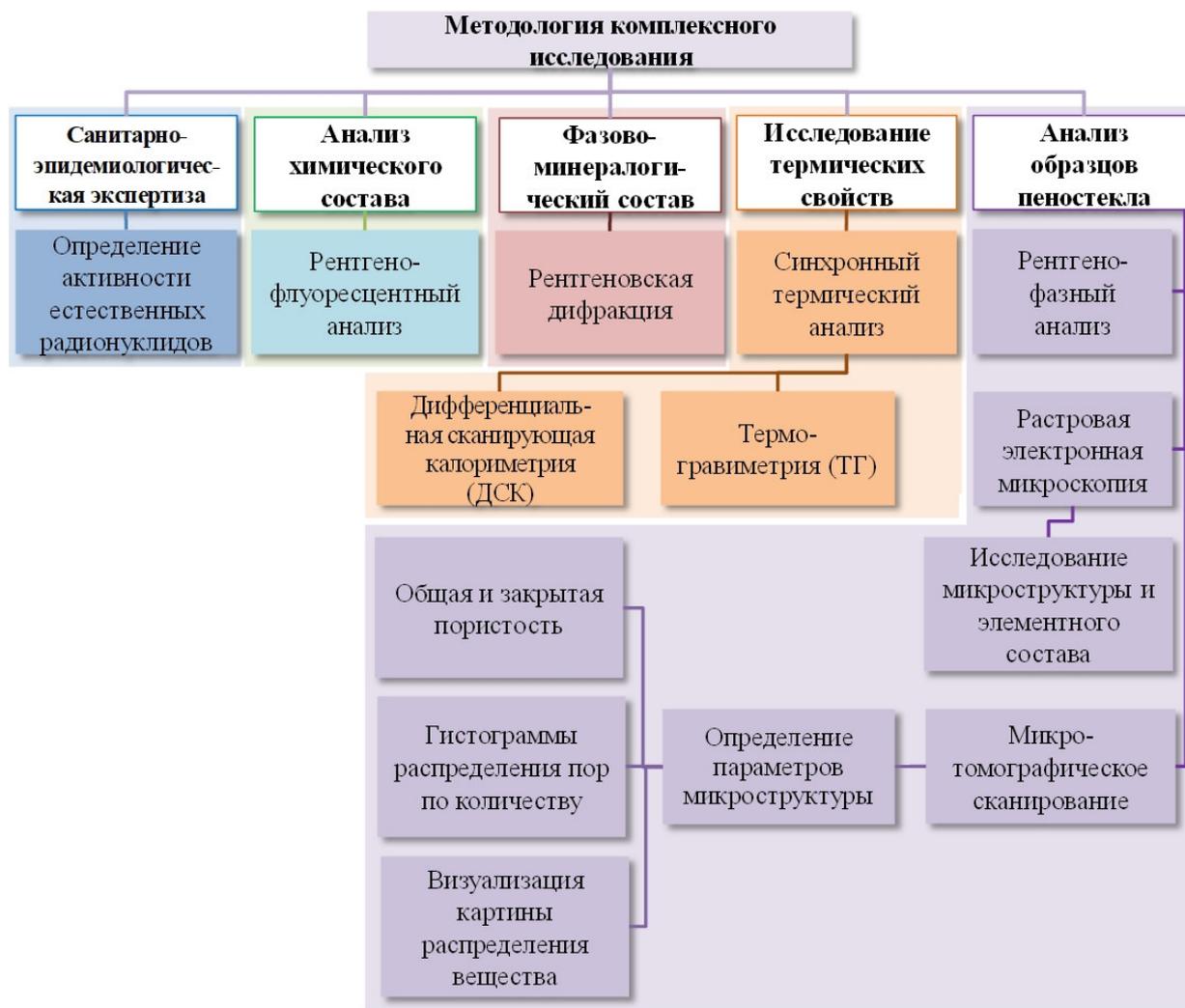


Рис. 2. Методология комплексного исследования

Для определения качественного и количественного фазового состава образцов пеностекла следует использовать метод рентгенофазового анализа. Исследование микроструктуры и элементного состава образцов рекомендуется выполнять с помощью растровой электронной микроскопии. Параметры микроструктуры пеностекла, такие как общая и закрытая пористость, гистограммы распределения объема пор по количеству, визуализация картины распределения вещества, наиболее плотных включений и пор в объеме, должны быть получены по результатам микротомографического сканирования [11, 12]. Термические свойства пеностекла рекомендуется исследовать методом синхронного термического анализа (СТА) с одновременной регистрацией кривых термогравиметрии (ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК).

Испытания свойств, получаемых образцов пеностекла (теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при

изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки) должны включать проверку соответствия требованиям ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме», ГОСТ EN 1602-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения кажущейся плотности», ГОСТ 33949-2016 «Изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений (Приложение А)», ГОСТ 17177-94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний», ГОСТ EN 1607-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при растяжении перпендикулярно к лицевым поверхностям», ГОСТ EN 12430-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при действии сосредоточенной нагрузки».



Рис. 3. Структурно-методологическая схема исследований

Исследования закономерности влияния микроструктуры пеностекла на его свойства (теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки) могут быть выполнены различными статистическими методами или методами теории машинного обучения. Выбор конкретного метода следует основывать, в первую очередь, на количестве изготовленных образцов. Более сложные методы требуют большего объема исходных данных, большего числа уровней варьирования параметров; в ином случае высока вероятность т.н. «переобучения», при котором модели будут демонстрировать высокую точность в ходе разработки и низкую – в реальных условиях. На практике изготовление большого числа образцов позволит разработать модель неоправданно повышенной нелинейности и зачастую наиболее целесообразным является использование методов моделирования с применением регрессионного и корреляционного анализов.

Важной является разработка состава исходной шихты и температурно-временного режима синтеза пеностекла. Данную задачу следует решать итерационно – методом последовательного приближения в следующем виде:

1. Поиск и анализ литературных источников, в которых для производства пеностекла используются аналогичные в части основного исходного состава шихты. Результатом данного этапа должен стать выбор температурно-временного режима «нулевого приближения».

2. Анализ литературных источников и определение модификаторов в качестве дополнительных элементов исходного состава шихты «нулевого приближения».

3. Выполнение моделирования процессов термообработки.

4. Анализ результатов; корректировка температурно-временного режима и переход на этапы 1, 2 или 3 в случае необходимости.

Выбор метода моделирования процессов термообработки является нетривиальной задачей [13, 14]. Термическая обработка является наиболее значимым, энергоемким и недостаточно исследованным этапом производства пеностекла. Она включает в себя этапы нагрева сырьевой смеси, вспенивания размягченной стекломассы и отжига пеностекла. На этот этап влияют факторы, связанные с теплообменными процессами, происходящими во время нагрева и вспенивания сырьевой смеси пеностекла, с образованием расплава в процессе вспенивания, и факторы, зависящие от условий стабилизации ячеистой струк-

туры и отжига пеностекла. Выбор метода моделирования процессов термообработки представлен на рисунке 4.

Стадия термической обработки (ТО) является приоритетной, поскольку именно на этой стадии формируются основные свойства и эксплуатационные характеристики пеностекла. Уровень проработки изучения данной стадии определяет возможность контроля и управления процессом ТО, а, следовательно, и эксплуатационными свойствами будущего материала. Сложность учета всех вышеперечисленных факторов вызывает необходимость создания упрощенных (приближенных) математических моделей. Широко применяемым подходом является замена решения задачи сопряженного переноса теплоты внутри твердого тела и в пограничном слое, обтекающем его теплоносителем, решением краевой задачи взаимосвязанного переноса в материале. Влияние теплоносителя учитывается в граничных условиях с использованием величин, определенных в соответствии с законами теплоотдачи. Однако, наиболее распространенные математические модели и методы [15, 16] позволяют моделировать макрофизические параметры процессов высокотемпературной обработки пеностекла. В работе [17] был представлен альтернативный подход, в котором оценка напряженно-деформированного состояния пеностекла осуществлялась численным методом на основе температурных кривых отжига. Ценность решений краевых задач теплопереноса в высокой степени определяется экспериментальными данными, особенно, зависимостями коэффициентов переноса, в частности теплопроводности, от потенциалов переноса [18]. В отечественной науке исторически существуют и развиваются два основных направления: «зональный» метод, разрабатываемый профессором С.П. Рудобаштой и его научной школой [19], и метод «микропроцессов», разрабатываемый академиком РААСН С.В. Федосовым [20]. «Зональный» метод и метод «микропроцессов» имеют схожую сущность, но различаются в ряде аспектов. В «зональном» методе весь диапазон влагосодержаний разбивается на концентрационные зоны, и значения теплофизических характеристик материала выбираются на основе среднего влагосодержания в каждой зоне. В методе «микропроцессов» используются интервалы времени, поэтому для каждой концентрационной зоны необходимо сначала рассчитать конечное влагосодержание, затем определить среднее влагосодержание и на его основе определить значения теплофизических характеристик и так далее. Оба метода были разработаны для учета изменений тепло- и массопереноса в

материале. Изменения зависят от влагосодержания и температуры материала. Методы могут

быть использованы для эффективного решения задачи моделирования.

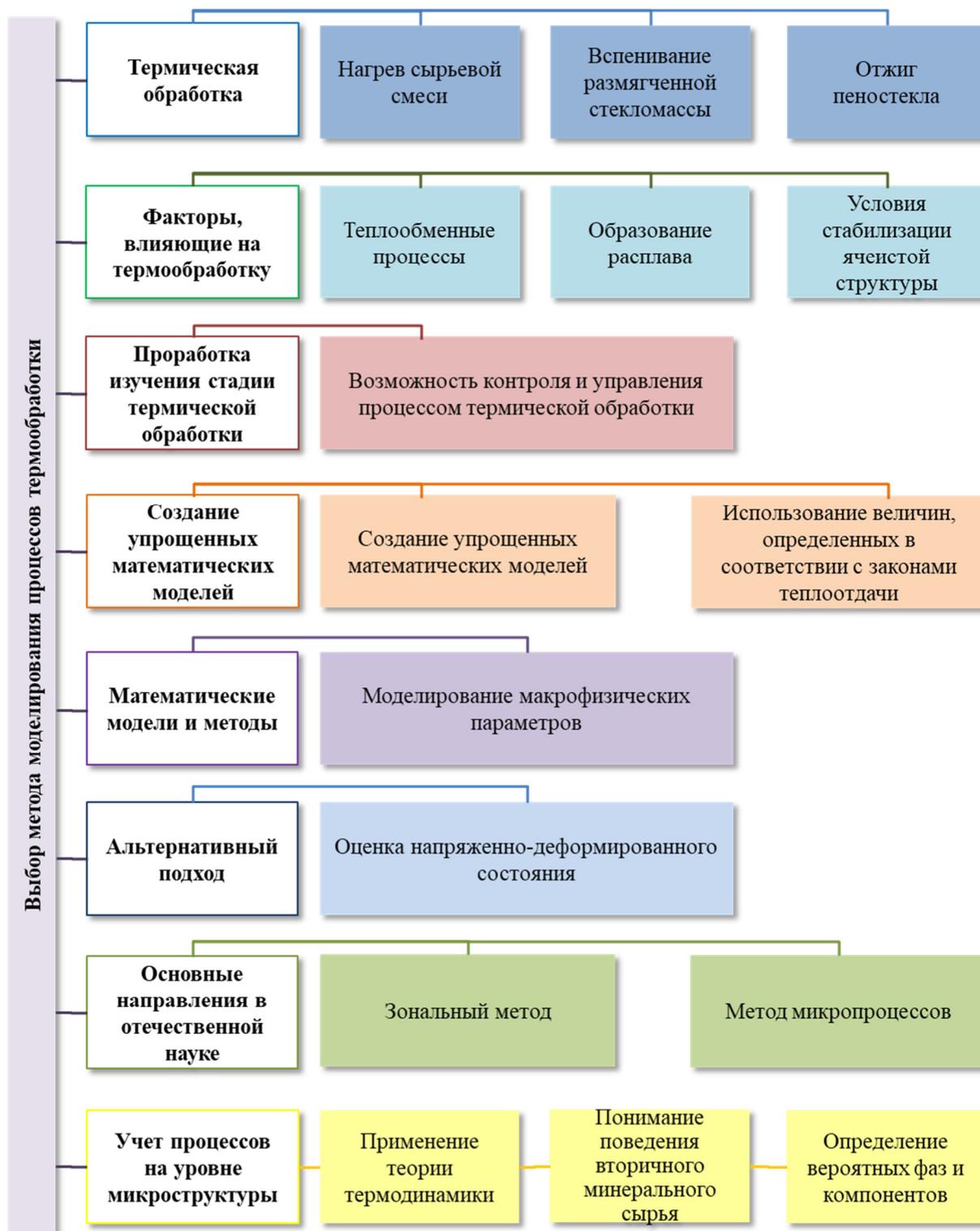


Рис. 4. Выбор метода моделирования процессов термообработки

При этом, с точки зрения необходимости учета процессов на уровне микроструктуры, следует расширить спектр используемых методов подходами на базе теории термодинамики. Для применения вторичного минерального сырья в технологическом процессе получения пено-

стекла, подразумевающим нагревание, необходимо понимание его поведения, в частности, вероятные фазовые переходы и преобразования. Следовательно, необходимо определение вероятных фаз и компонентов золошлаковой смеси, образующихся в процессе ее плавления. Для этого

целесообразно рассмотрение с позиций термодинамики процесса структурно-вещественного преобразования кремнийсодержащих отходов. Такие имитационные модели позволят установить закономерности протекания физических процессов и химических реакций, определить оптимальную температуру плавления, состав расплавов и исходной шихты.

Шихтовые составы для получения пеностекла включают стеклобой, как основной стеклообразующий компонент, золошлаковую смесь (ЗШС), как частичную замену стеклобоя, антрацит как порообразователь, MgO как модификатор, натрий тетраборнокислый 10-водный $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – для снижения температуры плавления, Cr_2O_3 и ZrO_2 , как катализаторы кристаллизации, мел технический в качестве дополнительного источника кальция для формирования кристаллических фаз.

Основная часть. В работе предлагается методология разработки и производства пеностекла, которая представляет собой многоступенчатый процесс, начинающийся с детального анализа свойств и влияния различных компонентов сырьевой шихты на структуру и свойства конечного продукта. Этот анализ позволяет определить оптимальные соотношения и типы компонентов сырьевой шихты для достижения требуемых характеристик пеностекла. Следующим этапом является оптимизация состава сырьевой шихты и режимов термообработки, что включает в себя выбор температурных режимов и времени обработки для формирования структуры пеностекла с заданными эксплуатационными свойствами. Для поддержки этого процесса используется математическая модель, которая позволяет прогнозировать свойства пеностекла на основе

входных параметров, таких как химический состав сырьевых компонентов и данные температурно-временного режима получения пеностекла. Применение современных методов анализа, включая рентгенофазовый анализ для изучения фазового состава, микротомографическое сканирование для визуализации структуры и термический анализ для определения тепловых свойств, обеспечивает глубокое понимание структуры и свойств пеностекла. Далее, с помощью статистического анализа и машинного обучения анализируются собранные данные для выявления закономерностей между составом сырьевой смеси, условиями получения пеностекла и его свойствами, что позволяет уточнить технологические параметры и повысить качество пеностекла. На заключительном этапе формулируются рекомендации по оптимизации технологических параметров, направленные на снижение затрат при сохранении или даже улучшении эксплуатационных характеристик пеностекла. Таким образом, предложенная методология обеспечивает комплексный подход к управлению процессом производства пеностекла, направленный на достижение высоких эксплуатационных характеристик при снижении затрат.

Для подтверждения предложенной методологии выполнена разработка материала на примере золошлаковой смеси ТЭС (Ростовская область, г. Новочеркасск). Химический состав золошлаковой смеси представлен кремнием, алюминием, железом, калием, кальцием (табл. 1). Параметры кристаллических фаз, содержащихся в золошлаковой смеси, представлены в таблице 2. Степень кристалличности исследуемого образца золошлаковой смеси равна 59,6 %. Результаты исследования иных характеристик представлены в [21].

Таблица 1

Химический состав золошлаковой смеси

Оксид	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Значение	57,13	0,88	21,46	10,55	0,12	1,73	2,90	1,11	3,28
Оксид	P_2O_5	BaO	SO_3	V_2O_5	Cr_2O_3	NiO	LOI	SUM	–
Значение	0,13	0,14	0,07	0,03	0,02	0,01	0,43	99,99	–

Таблица 2

Параметры обнаруженных кристаллических фаз в золошлаковой смеси

Кристаллическая фаза	Химическая формула	Массовая доля, мас. %	Размер, нм
Кварц	SiO_2	74,0	64,6
оксид железа (II, III)	Fe_3O_4	10,1	16,0
оксид алюминия калия	$\text{Al}_9\text{KO}_{9,5}$	15,9	74,2

С учетом полученных результатов и анализа научно-технической литературы [22–25] и ранее выполненных исследований [6, 7] определен температурно-временной режим синтеза (рис. 5),

спроектированы составы шихт для получения пеностекла с различной долей содержания кристаллической фазы в аморфной структуре (табл. 3).

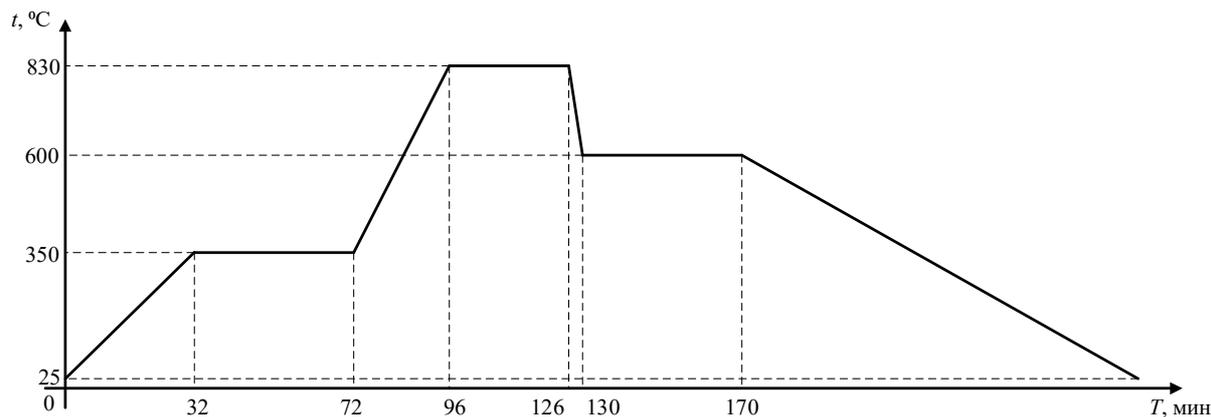


Рис. 5. Температурный режим синтеза

Таблица 3

Шихтовые составы для получения пеностекла

Состав	Компоненты, масс. %							
	ЗШС	Стеклобой	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Антрацит	Мел	ZrO_2	MgO	Cr_2O_3
0	26	60	8	6	–	–	–	–
1	26	60	8	6	–	–	–	0,7
2	26	60	8	6	–	–	–	0,9
3	26	60	8	6	1,7	0,3	–	–
4	26	60	8	6	4,3	0,3	–	–
5	26	60	8	6	1,7	–	0,3	–
6	26	60	8	6	4,3	–	0,3	–
7	26	60	8	6	1,7	–	–	0,3
8	26	60	8	6	4,3	–	–	0,3

Составы шихт для пеностекла разработаны таким образом, чтобы установить зависимость факторов, оказывающих влияние на кристаллизацию межпорowych перегородок. Введение инициаторов кристаллизации и модификаторов в шихтовые составы дает возможность оценки их влияния на параметры кристаллической фазы в аморфной структуре материала.

Исследования пространственной макро- и микроструктуры пеностекла выполнены с использованием микротомографического анализа. В качестве примера на рисунке 6 представлены результаты для нулевого состава пеностекла.

По результатам микротомографического исследования для образцов пеностекла проведен анализ распределения пор в пространстве, а также соотношения количества пор от их размера. Результаты наглядно демонстрируют равномерное распределение кристаллической фазы в каркасе материала.

Задача имитационного моделирования решена с использованием метода минимизации изобарно-изотермического потенциала Гиббса в программном комплексе «Селектор-С». Адекватность модели проверена расчетом трех точек на

трехкомпонентной диаграмме, которая демонстрирует состояние $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ в используемом программном комплексе «Селектор-С». Расчеты проведены при температуре 850 °С. Результаты расчета достаточно согласуются с экспериментальными данными известных диаграмм состояния. Получены численные значения количества вероятных фаз и компонентов, образующихся в процессе синтеза образцов пеностекла. Техника формирования модели и проведение численных экспериментов – определение начальных условий и ограничений, задание р,Т-сценариев процессов и анализ результатов имитации, подробно описаны в [26]. Кроме того, для каждого состава шихты пеностекла определены закономерности протекания физических процессов и химических реакций в процессе создания пеностекла, в частности, последовательность образования кристаллических фаз посредством применения физико-химического моделирования, реализованного в программном комплексе «Селектор-С». Исследованы температурные условия процесса и химический состав исходного сырья, как наиболее значимые составляющие технологического процесса. Для повышения эффективности автоматического управления

технологическими этапами необходимы инструменты контроля, основанные на методе физико-химического моделирования. Термодинамическое моделирование взаимодействия компонентов исходной шихты выполнено для температур: 360 °С, 400 °С, 600 °С, 700 °С, 800 °С, 860 °С и разработанных составов, отличающихся техно-

логическими добавками [27]. Анализ полученных результатов показал отсутствие необходимости корректировки температурно-временного режима и оптимальность подобранных модификаторов для экспериментальной проверки возможности управления кристаллической фазы в аморфной структуре.

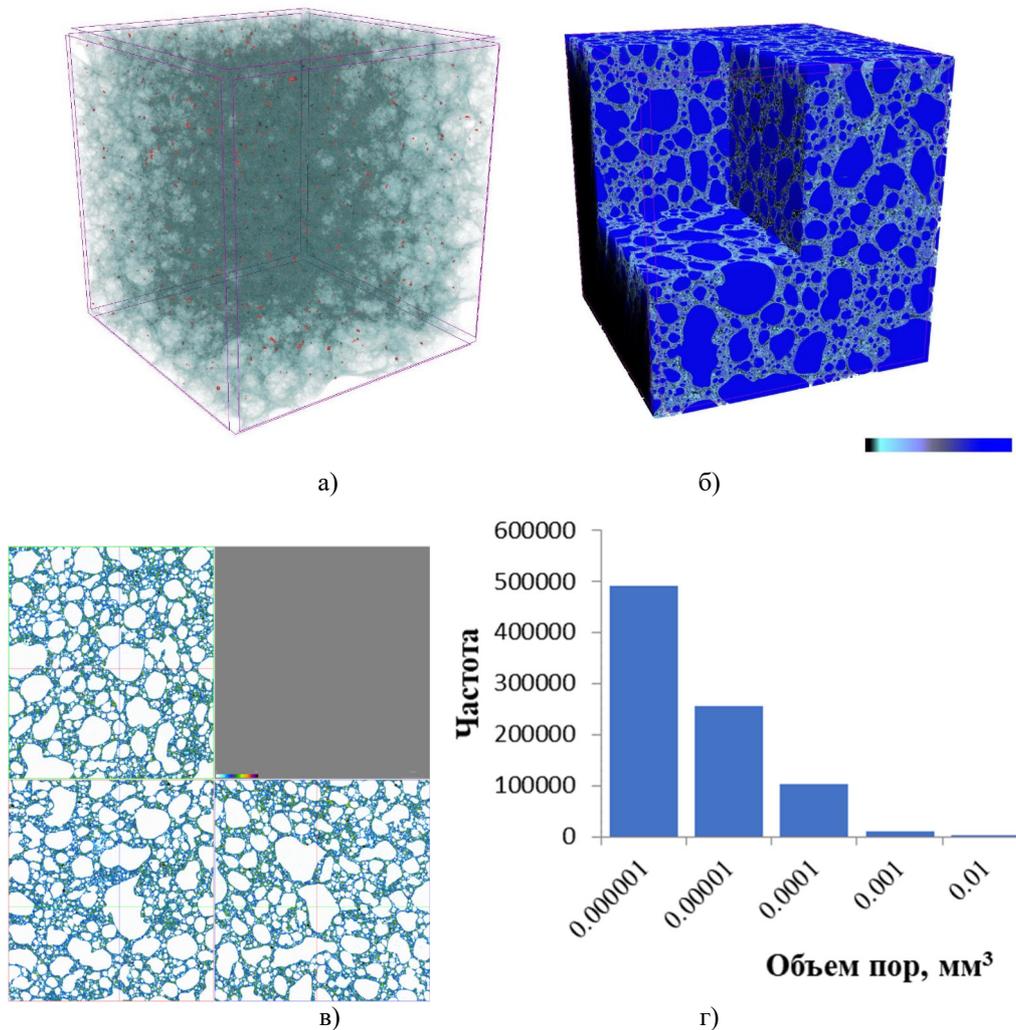


Рис. 6. Микроструктура нулевого образца:

- а) визуализация распределения частиц с высокой плотностью (выделено красным) в объеме образца,
- б) визуализация распределения пор в образце (в 2D срезах), размер образца 10 мм,
- в) визуализация распределения пор в объеме образца, цветом кодируется размер пор от черного (наименьшие) к синему (наибольшие) (цветовая шкала снизу справа),
- г) гистограммы распределения объема пор по количеству (частота встречаемости)

Изучение закономерности влияния микроструктуры пеностекла на его эксплуатационные свойства выполнено с применением регрессионного и корреляционного анализов. В качестве примера приведена регрессионная модель зависимости количества кристаллической фазы от со-

держания оксидов в исходной шихте, характеризующая значимость компонентов и оказываемое на нее влияние. Положительный знак коэффициента перед переменной означает, что повышение количества оксида приведет к увеличению содержания кристаллической фазы в каркасе пеностекла.

$$K(x_{\text{компл}}) = 6.88 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} - 3.19 \cdot x_{\text{CaO}} + 2.33 \cdot x_{\text{MgO}} + 2.22 \cdot x_{\text{ZrO}_2} + 2.22 \cdot x_{\text{P}_2\text{O}_5} - 1.95 \cdot x_{\text{K}_2\text{O}} - 1.79 \cdot x_{\text{BaO}} + 1.72 \cdot x_{\text{V}_2\text{O}_5} + 1.17 \cdot x_{\text{SO}_3} - 1.04 \cdot x_{\text{Na}_2\text{O}} + 0.72 \cdot x_{\text{SiO}_2} + 0.67 \cdot x_{\text{TlO}_2} - 0.66 \cdot x_{\text{B}_2\text{O}_3} + 0.25 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 0.08 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + 0.002 \cdot x_{\text{MnO}} + 4.39. \quad (1)$$

Выводы. Выдвинута следующая научная гипотеза: управление прочностными свойствами пеностекла возможно путем создания гетерогенной структуры, включающей кристаллические фазы определенных параметров. С практической точки зрения одновременно необходимо соблюдать существующие тенденции к снижению стоимости продукта. Многочисленными исследованиями доказано, что применение вторичного минерального сырья в качестве замены компонентов природного происхождения ожидаемо приведет к снижению стоимости пеностекла.

Установлены адекватные методы исследования вторичного минерального сырья, изучения их микро-, макроструктуры и эксплуатационных свойств образцов, исследования влияния микроструктуры пеностекла (количество кристаллической фазы, размер кристаллов и др.) на его эксплуатационные. Сформирована единая методология, позволяющая решать задачу проектирования новых материалов при использовании отходов различного состава, особенное внимание в которой уделено задаче разработки состава исходной шихты и температурно-временного режима синтеза пеностекла.

Данную задачу следует решать итерационно – методом последовательного приближения путем анализа литературных источников для выбора температурно-временного режима и дополнительных элементов (модификаторов) исходного состава шихты «нулевого приближения», моделирования процессов термообработки, анализа результатов и корректировки температурно-временного режима с последующим переходом к предыдущим этапам в случае необходимости.

Проанализированы существующие методы моделирования на макроуровне. Определено, что с точки зрения необходимости учета процессов на уровне микроструктуры, следует расширить спектр используемых методов подходами на базе теории термодинамики.

Для подтверждения предложенной методологии выполнена разработка материала на примере золошлаковой смеси ТЭС в г. Новочеркаске. Задача имитационного моделирования решена с использованием метода минимизации изобарно-изотермического потенциала Гиббса. Анализ полученных результатов показал отсутствие необходимости корректировки температурно-временного режима и оптимальность подобранных модификаторов для экспериментальной проверки возможности управления кристаллической фазы в аморфной структуре.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить особенности процессов формирования микроструктуры пеностекла.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность за научные консультации, оказанные при проведении теоретических и экспериментальных исследований, а также при обсуждении результатов работы научному консультанту, академику РААСН, доктору технических наук, профессору Федосову Сергею Викторовичу и советнику РААСН, доктору технических наук, доценту Баканову Максиму Олеговичу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цопа Н.В., Шаленный В.Т., Степанцова В.В. Оценка сравнительной эффективности утепления и отделки стен пеностеклом или пенополистиролом на примере многоэтажного дома в г. Феодосии // Экономика строительства и природопользования. 2023. № 3(88). С. 55–64.
2. Шаленный В.Т., Степанцова В.В., Халилов А.Э. Усовершенствованная конструктивно-технологическая система утепления и отделки наружных стен изделиями из пеностекла и её окупаемость // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № 28(80). С. 29–36.
3. Трифонов Е.Г., Шухардин А.А. Анализ теплоизоляционных материалов для резервуаров сжиженного природного газа // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2022. № 2(18). С. 17–27.
4. Tokach Y.E., Evtushenko E.I., Vyrodov O.S. Features of Structural Formation and Properties of Technogenic Raw Materials in Construction Material Production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. Pp. 022013. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022013.
5. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. Оценка возможности использования золы Рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 71–81. DOI 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81.
6. Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // Строительные материалы. 2019. № 4. С. 77. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83.
7. Марков А.Ю., Строкова В.В., Безродных А.А., Степаненко М.А. Свойства топливных зол различных типов как компонентов битумной эмульсии // Строительство и реконструкция. 2020. № 2(88). С. 67–76. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-67-76.
8. Красновских М.П., Паршуков А.М., Лебедева Д.А., Вараксин К.М., Мокрушин И.Г. Опыт получения стеновой керамики с добавлением карбонатсодержащих отходов // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 9. С. 40–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-9-40-45.

9. Рахимов Р.В., Абдуллаев Б.А., Жумабеков Б.Ш., Эргашева В.В., Рузметов М.К. Сравнение рентгеновской компьютерной томографии и металлографии для определения размера пор // *Металлург.* 2023. № 6. С. 94–100. DOI: 10.52351/00260827_2023_06_94.
10. Шаванов Н.Д., Панков П.П., Бесполитов Д.В., Коновалова Н.А., Евсюков С.А., Авсеенко Н.Д., Фаткулин А.А., Лушпей В.П. Утилизация паровозных шлаков в составах композиционных материалов для усиления земляного полотна железнодорожного пути // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского.* 2024. № 1(91). С. 63–73. DOI: 10.17277/voprosy.2024.01.pp.063-073.
11. Баканов М.О. Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 1: Формирование динамики циклических нестационарных двумерных температурных полей // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии.* 2021. № 2(18). С. 87–102.
12. Баканов М.О. Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 2: Формирование пористой структуры на стадии вспенивания // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии.* 2021. № 3(19). С. 89–102.
13. Логачев К.И., Зиганшин А.М., Тирон О.В., Аверкова О.А., Попов Е.Н., Уваров В.А., Гольцов А.Б. Численное определение границ вихревых зон на входе в круглые отсосы-распределители над плоскостью // *Строительство и технологическая безопасность.* 2022. № S1. С. 251–260.
14. Кушев Л.А., Уваров В.А., Рамазанов Р.С., Саввин Н.Ю. Моделирование процесса подсоса первичного воздуха в бытовой газовой горелке на биогазовом топливе // *Научный журнал строительства и архитектуры.* 2022. № 2(66). С. 49–56. DOI: 10.36622/VSTU.2022.66.2.004.
15. Грушко И.С. Исследование напряжений пеностекла с учетом тепловых нагрузок при отжиге // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2018. № 2(198). С. 90–95.
16. Федосов С.В., Баканов М.О. Моделирование процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с применением метода «микропроцессов» для области малых значений числа Фурье // *Изв. вузов. Химия и хим. Технология.* 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 78–83.
17. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2013. 478 с.
18. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 363 с.
19. Грушко И.С. Теоретическое и практическое изучение золошлаковой смеси ТЭС Ростовской области как сырьевого материала для производства пеностекла // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура.* 2020. № 4(81). С. 168–186.
20. Сопегин Г.В., Рустамова Д.Ч., Федосеев С.М. Анализ существующих технологических решений производства пеностекла // *Вестник МГСУ.* 2019. Т. 14. № 12. С. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609.
21. Пат. 2485058 Российская Федерация, МПК С03В 19/08, С03С 11/00. Способ получения теплоизоляционного облицовочного материала на основе пеностекла / Пучка О.В., Бессмертный В.С., Степанова М.Н., Калмыкова Е.В., Сергеев С.В.; заявитель и патентообладатель Белгородский гос. технологический ун-т им. В.Г. Шухова. № 2011145010/03; заявл. 07.11.2011; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.
22. Пат. 2503647 Российская Федерация, МПК С04В 38/08. Способ получения строительного материала / Дамдинова Д.Р., Давлетбаев М.А., Павлов В.Е., Алексеева Э.М.; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский гос. ун-т технологий и управления. № 2012133577/03; заявл. 06.08.2012; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.
23. Пат. 2697981 Российская Федерация, МПК С03В 19/08, С03С 11/00. Способ получения пеностекла / Онищук В.И., Гливуку А.С., Гливуку Е.А., Дороганов В.А., Коробанова Е.В., Мишин Д.А.; заявитель и патентообладатель Белгородский гос. технолог. ун-т им. В.Г. Шухова. - № 2018143212; заявл. 05.12.2018; опубл. 21.08.2019, Бюл. № 24.
24. Грушко И.С., Маслаков М.П. Формирование кристаллической фазы в матрице пеностекла и ее влияние на эксплуатационные свойства материала // *Стекло и керамика.* 2018. № 12. С. 10–16.
25. Грушко И.С. Пути формирования и особенности развития кристаллической фазы в аморфном материале // *Физика и химия стекла.* 2020. Т. 46. № 6. С. 585–604. DOI: 10.31857/S0132665120060104.
26. Grushko I.S., Bychinskii V.A., Chudnenko K.V. Physicochemical Simulation of the Melting Process of Silicon-Containing Waste from the Energy Complex // *Journal of the Minerals Metals & Materials Society.* 2021. Vol. 73. No 10. Pp. 3000–3009. DOI: 10.1007/s11837-021-04820-w.
27. Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С., Бычинский В.А. Моделирование физико-

химических процессов при синтезе пеностекла различных модификаций: фазовый анализ и прогнозирование свойств // Construction and

Geotechnics. 2023. Т. 14. № 4. С. 19–33. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.02.

Информация об авторах

Грушко Ирина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленное гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение. E-mail: grushkois@gmail.com. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Россия, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132.

Поступила 29.07.2024 г.

© Грушко И.С., 2024

Grushko I.S.

Platov South-Russian state polytechnic university (NPI)

E-mail: grushkois@gmail.com

THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL BASIS OF THE PROCESSES OF FORMING THE MICROSTRUCTURE OF FOAM GLASS USING SECONDARY MINERAL RAW MATERIALS

Abstract. Increasing the strength of foam glass to values sufficient for using it not only as a heat-insulating but also a structural material will significantly expand the scope of its application and reduce the material intensity of construction. The solution is possible due to the formation of a controlled and predictable heterogeneous amorphous-crystalline structure. The effect of the crystalline phase on the structure and strength of foam glass is contradictory and requires significant attention. At the same time, it is necessary to take into account the already obtained research results on reducing the cost of the material due to the use of waste. However, the composition of waste from various landfills varies, so a universal methodology for the development of materials is needed. A unified methodology is proposed that allows solving the problem of designing new materials using waste of various compositions, special attention is paid to the problem of synthesizing the composition of the initial batch and the temperature-time mode of foam glass synthesis. To confirm the proposed methodology, the material was developed using the example of ash and slag mixture of the TPP in Novocherkassk. The obtained foam glass samples and the research results were used to establish the features of the processes of formation of the foam glass microstructure using the regression analysis method.

Keywords: foam glass, crystalline phase, physical and chemical modeling, crystallization initiator, modifier

REFERENCES

1. Copa N.V., Shalenij V.T., Stepanova V.V. Evaluation of the comparative efficiency of insulation and finishing of walls with foam glass or expanded polystyrene using the example of a multi-storey building in Feodosia [Ocenka sravnitel'noj effektivnosti utepleniya i otdelki sten penosteklom ili penopolistiroлом na primere mnogoetazhnogo doma v g. Feodosii]. Economics of construction and nature management. 2023. No. 3(88). Pp. 55–64. (rus)

2. Shalennyj V.T., Stepanova V.V., Halilov A.E. Improved design and technological system for insulation and finishing of external walls with foam glass products and its payback [Uovershenstvovannaya konstruktivno-tekhnologicheskaya sistema utepleniya i otdelki naruzhnyh sten izdeliyami iz penostekla i eyo okupaemost']. Construction and technological safety. 2023. No. 28(80). Pp. 29–36. (rus)

3. Trifonov E.G., SHuhardin A.A. Analysis of thermal insulation materials for liquefied natural gas tanks [Analiz teploizolyacionnyh materialov dlya

rezervuarov szhizhennogo prirodnoгo gaza]. Bulletin of the young scientist of USPTU. 2022. No. 2(18). Pp. 17–27. (rus)

4. Tokach Y.E., Evtushenko E.I., Vyrodov O.S. Features of Structural Formation and Properties of Technogenic Raw Materials in Construction Material Production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. 022013. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022013.

5. Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Evtushenko E.I. Assessment of the possibility of using ash from Reftinskaya GRES in the production of continuous fiberglass [Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya zoly Reftinskoj GRES v proizvodstve nepreryvnogo steklovolokna]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81. (rus)

6. Markov A.Yu., Strokova V.V., Markova I.Yu. Evaluation of the properties of fuel ashes as components of composite materials [Ocenka svoystv toplivnyh zol kak komponentov kompozicionnyh materialov]. Construction Materials. 2019. No. 4. Pp.

77. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83. (rus)

7. Markov A.Yu., Strokova V.V., Bezrodnih A.A., Stepanenko M.A. Properties of fuel ashes of different types as components of bitumen emulsion [Svoystva toplivnyh zol razlichnyh tipov kak komponentov bitumnoj emul'sii]. Construction and reconstruction. 2020. No. 2(88). Pp. 67–76. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-67-76. (rus)

8. Krasnovskih M.P., Parshukov A.M., Lebedeva D.A., Varaksin K.M., Mokrushin I.G. Experience in obtaining wall ceramics with the addition of carbonate-containing waste [Opyt polucheniya stenovoj keramiki s dobavleniem karbonatsoderzhashchih othodov]. Ecology and industry of Russia. 2023. Vol. 27. No. 9. Pp. 40–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-9-40-45. (rus)

9. Rahimov R.V., Abdullaev B.A., Zhumabekov B.Sh., Ergasheva V.V., Ruzmetov M.K. Comparison of X-ray computed tomography and metallography for pore sizing [Sravnenie rentgenovskoj komp'yuternoj tomografii i metallografii dlya opredeleniya razmera por]. Metallurgist. 2023. No 6. Pp. 94–100. DOI: 10.52351/00260827_2023_06_94. (rus)

10. Shavanov N.D., Pankov P.P., Bespolitov D.V., Konovalova N.A., Evsyukov S.A., Avseenko N.D., Fatkulin A.A., Lushpej V.P. Utilization of locomotive slag in composite materials for strengthening the roadbed of a railway track [Utilizaciya parovoznyh shlakov v sostavah kompozicionnyh materialov dlya usileniya zemlyanogo polotna zhelezodorozhnogo puti]. Issues of modern science and practice. Vernadsky University. 2024. No. 1(91). Pp. 63–73. DOI: 10.17277/voprosy.2024.01.pp.063-073 (rus)

11. Bakanov M.O. Modeling of high-temperature processes in foam glass technology. Part 1: Formation of dynamics of cyclic non-stationary two-dimensional temperature fields [Modelirovanie vysokotemperaturnykh processov v tekhnologii penostekla. CHast' 1: Formirovanie dinamiki ciklicheskih nestacionarnykh dvumernykh temperaturnykh polej]. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2021. No. 2 (18). Pp. 87–102. (rus)

12. Bakanov M.O. Modeling of high-temperature processes in foam glass technology. Part 2: Formation of a porous structure at the foaming stage [Modelirovanie vysokotemperaturnykh processov v tekhnologii penostekla. CHast' 2: Formirovanie poristoj struktury na stadii vspenivaniya]. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2021. No. 3 (19). Pp. 89–102. (rus)

13. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Tiron O.V., Averkova O.A., Popov E.N., Uvarov V.A., Goltsov

A.B. Numerical determination of the boundaries of vortex zones at the entrance to round bell-shaped exhaust hoods above a plane [CHislennoe opredelenie granic vihrevykh zon na vhode v kruglye otsosy-rastruby nad ploskost'yu]. Construction and technological safety. 2022. No. S1. Pp. 251–260. (rus)

14. Kushchev L.A., Uvarov V. A., Ramazanov R. S., Savvin N. Yu. Modeling the process of primary air suction in a domestic gas burner on biogas fuel [Modelirovanie processa podsosa pervichnogo vozduha v bytovoj gazovoj gorelke na biogazovom toplive]. Scientific journal of construction and architecture. 2022. No. 2 (66). Pp. 49–56. DOI: 10.36622/VSTU.2022.66.2.004. (rus)

15. Grushko I. S. Study of stresses in foam glass taking into account thermal loads during annealing [Issledovanie napryazhenij penostekla s uchetom teplovykh nagruzok pri otzhige]. News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical sciences. 2018. No. 2 (198). Pp. 90–95. (rus)

16. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Modeling of heat conduction and diffusion processes in bodies of canonical form using the "microprocesses" method for the region of small values of the Fourier number [Modelirovanie processov teploprovodnosti i diffuzii v telah kanonicheskoy formy s primeneniem metoda «mikroprocessov» dlya oblasti malyh znachenij chisla Fur'e]. News of higher educational institutions. Chemistry and Chemical Technology. 2021. Vol. 64. No. 10. Pp. 78–83. (rus)

17. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffusion in chemical engineering processes [Diffuziya v himiko-tekhnologicheskikh processah]. Moscow: KoloC, 2013. 478 p. (rus)

18. Fedosov S.V. Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry [Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh processah stroitel'noj industrii]. Ivanovo: IPK «PresCto», 2010. 363 p. (rus)

19. Grushko I. S. Theoretical and practical study of ash and slag mixture of thermal power plants of the Rostov region as a raw material for the production of foam glass [Teoreticheskoe i prakticheskoe izuchenie zoloshlakovoj smesi TES Rostovskoj oblasti kak syr'evogo materiala dlya proizvodstva penostekla]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2020. No 4(81). Pp. 168–186. (rus)

20. Sopegin G.V., Rustamova D.Ch., Fedoseev S.M. Analysis of existing technological solutions for the production of foam glass [Analiz sushchestvuyushchih tekhnologicheskikh reshenij proizvodstva penostekla]. MGSU Bulletin. 2019. Vol. 14, No. 12. Pp. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609 (rus)

21. Patent 2485058 Russian Federation, IPC C03B 19/08, C03C 11/00. Method for producing a heat-insulating facing material based on foam glass [Sposob polucheniya teploizolyacionnogo oblicovochnogo materiala na osnove penostekla]. Puchka O. V., Bessmertny V. S., Stepanova M. N., Kalmykova E. V., Sergeev S. V.; applicant and patent holder Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. No. 2011145010/03; declared 07.11.2011; published 20.06.2013, Bulletin No. 17. (rus)

22. Patent 2503647 Russian Federation, IPC C04B 38/08. Method for producing building material [Sposob polucheniya stroitel'nogo materiala]. Damdinova D.R., Davletbaev M.A., Pavlov V.E., Alekseeva E.M.; applicant and patent holder East Siberian State University of Technology and Management. No. 2012133577/03; declared 06.08.2012; published 10.01.2014, Bulletin No. 1. (rus)

23. Patent 2697981 Russian Federation, IPC C03B 19/08, C03C 11/00. Method for producing foam glass [Sposob polucheniya penostekla] / Onishchuk V.I., Glivuk A.S., Glivuk E.A., Doroganov V.A., Korobanova E.V., Mishin D.A.; applicant and patent holder Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. No. 2018143212; declared 05.12.2018; published 21.08.2019, Bulletin No. 24. (rus)

24. Grushko I.S., Maslakov M.P. Formation of the crystalline phase in the foam glass matrix and its influence on the performance properties of the material [Formirovanie kristallicheskoj fazy v matricе penostekla i ee vliyanie na ekspluatacionnye svoystva materiala]. Glass and Ceramics. 2018. No. 12. Pp. 10-16. (rus)

25. Grushko I.S. Paths of formation and features of development of the crystalline phase in an amorphous material [Puti formirovaniya i osobennosti razvitiya kristallicheskoj fazy v amorfnom materiale]. Glass Physics and Chemistry. 2020. Vol. 46, No. 6. Pp. 585–604. DOI: 10.31857/S0132665120060104 (rus)

26. Grushko I.S., Bychinskii V.A., Chudnenko K.V. Physicochemical Simulation of the Melting Process of Silicon-Containing Waste from the Energy Complex. Journal of the Minerals Metals & Materials Society. 2021. Vol. 73. No. 10. Pp. 3000–3009. DOI 10.1007/s11837-021-04820-w.

27. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Grushko I.S., Bychinsky V.A. Modeling of physicochemical processes in the synthesis of foam glass of various modifications: phase analysis and prediction of properties [Modelirovanie fiziko-himicheskikh processov pri sinteze penostekla razlichnyh modifikacij: fazovyj analiz i prognozirovanie svoystv]. Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14, No. 4. Pp. 19–33. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.02 (rus)

Information about the authors

Grushko, Irina S. PhD. E-mail: grushkois@gmail.com. Platov South-Russian state polytechnic university (NPI). Russia, 346428, Rostov reg., Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132.

Received 29.07.2024

Для цитирования:

Грушко И.С. Теоретические и технологические основы процессов формирования микроструктуры пеностекла с использованием вторичного минерального сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-8-22

For citation:

Grushko I.S. Theoretical and technological basis of the processes of forming the microstructure of foam glass using secondary mineral raw materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-8-22