

## ОБЗОР СВЯЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В СИНТАКТНЫХ ПЕНАХ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

*Рыженков А.В., Логинова Н.А., Беляева Е.В., Лапин Е.Е., Прищепов А.Ф.  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

### Аннотация

Статья посвящается теплоизоляционным покрытиям, применяемым в энергетике. Особое внимание уделяется синтактным пенам, создаваемым с использованием микросфер и различного рода связующих. Проводится анализ используемых в синтактных пенах сырья. Использование микросфер в структуре синтактных пен определяет их теплоизолирующие свойства, обеспечивает снижение плотности и теплопроводности материала, в то время как связующие вещества обеспечивают механическую прочность и термостабильность теплоизоляционного покрытия.

### Ключевые слова

Теплоизоляция, конструкции, теплоизоляционные материалы, синтактные пены, микросферы, композиционные материалы, теплопроводность, механическая прочность

### 1. Введение

Сегодня на рынке теплоизоляционных материалов (ТМ) представлен широкий класс теплоизоляционных покрытий, создаваемых с использованием различного рода связующих и микросфер, так называемые синтактные пены. Синтактные пены - вид газонаполненных композиционных полимерных материалов (ПКМ), наполнителями в которых служат полые сферические частицы, равномерно распределенные в связующем. Ячейки в таких пенах образуются

не вспениванием полимера, а благодаря введению полых микросфер [1]. Наличие в составе микросфер делает его, по сути, закрытопористым материалом.

Производители синтактных пен предлагают использовать их как для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений, так и для защиты промышленных объектов, эксплуатирующихся при температурах до 600 °С, например, трубопроводов и энергетического оборудования. Вместе с тем, встречаются публикации с резко отрицательными оценками этого вида теплоизоляционных покрытий [2]. Основанием для критики служат рекламные материалы ряда фирм-производителей, которые указывают значение коэффициента теплопроводности ТТП ~ 0,001 Вт/(м·К), и как следствие рекомендации формировать слой теплоизоляции, например, на поверхности трубопровода системы теплоснабжения с температурой теплоносителя ~ 150 °С толщиной всего 1÷2 мм. Основной причиной таких противоречий является малая изученность свойств синтактных пен применительно к высокотемпературным объектам, отсутствие их классификации.

Количество и качество введенных микросфер определяет теплоизолирующие свойства материала, при этом возникают сопутствующие эффекты: повышение вязкости и возникновение или усиление прочности системы [3-5]. У большинства изученных наполненных систем обнаруживается критическая степень наполнения, выше которой наблюдается резкое изменение значений реологических параметров и прочностных показателей [6].

Введение в полимеры микросфер, как и прочих наполнителей, сопровождается формированием нового комплекса свойств композиций. Этот процесс является результатом межфазных взаимодействий на границе раздела полимер - твердое тело, к которым, прежде всего, относятся адсорбционные или молекулярные взаимодействия, которые являются ответственными за адгезию на межфазной границе, физические, механические и другие свойства наполненных систем [7]. Немало важным является оптимальный выбор сочетания полимера и наполнителя. Механические свойства наполненных композиций могут меняться в зависимости от формы частиц наполнителя. Необходимо учитывать не только природу, форму

и характер распределения частиц наполнителя, но и их взаимодействие по границе раздела фаз [8].

В свою очередь связующие вещества в составе синтактных пен обеспечивают механическую прочность и термостабильность теплоизоляционного покрытия, а при использовании на поверхности металлической подложки, дополнительную антикоррозионную защиту [4, 9-10].

Целью настоящего обзора является выявление наиболее перспективных связующих веществ для изготовления синтактных пен, предназначенных для использования в теплоизоляционных конструкциях энергетического оборудования и трубопроводов.

При подготовке статьи анализировалась и обобщалась патентная информация, данные учебно-методических пособий и научно-технических периодических изданий.

## **2. Анализ патентной информации**

В таблице 1 представлены патенты, описывающие ТМ, наполнителями в которых являются микросферы [6, 11-21].

Наибольшее распространение для получения синтактных пен нашли связующие на основе органических полимеров: акриловые латексы и эпоксидные смолы, пенополиуретан, благодаря тому, что они характеризуются высокой адгезией, как к металлу, так и к материалу микросфер [1]. С целью повысить эффективность конечного материала в ПКМ вводят различные добавки: пластификаторы, антипирены, диспергаторы, стабилизаторы и пигменты.

Таблица 1 - Патенты, описывающие теплоизоляционные материалы с использованием микросфер

| Наполнители  | Связующее  | Другие добавки   | Функциональность,<br>макс. температура применения  |
|--|--|--|--|
| Заполненные воздухом керамические и кремниевые, белая сажа; аэрогель; вспученный вермикулит; вспученный перлит | Акриловый латекс.  | Пеногаситель Sotro-145;<br>Консервант;<br>Пигмент;<br>Диспергатор;<br>Загуститель;<br>Вода;<br>Гидрофобизатор  | Тепло-, гидроизоляция, шумопоглощение, антикоррозионная защита, огнестойкость, износостойкость. Термостойкость покрытия 600 – 650°C, коэффициентом теплопроводности 0,001 Вт/м×К |
| Модифицированные зольные микросферы  | Полиуретан.  | -  | Повышенная прочность материала, по сравнению с не модифицированными микросферами, снижение влагопоглощения в 2-7 раз.  |
| Стеклянные, керамические, полимерные, зольные и их смеси (размер 10-500 мкм)                                   | Латексная композиция: гомополимер акрилата, стиролакрилатный сополимер, бутадиенстирольный сополимер, полистирол, бутадиеновый полимер, полихлорвиниловый полимер, полиуретановый полимер, полимер или сополимер винилацетата. | Вода, ПАВ (ОП-6, ОП-7, ОП-10, праксанолы), пигменты (двуокись титана/ оксид цинка), огнестойкие добавки (тригидрат алюминия, полифосфат аммония, борат цинка, слюда, асбест), Преобразователь ржавчины ПРЛ-2, ингибиторы коррозии (нитрит натрия, бензоат натрия, хромат гуанидина, тетраоксихромат цинка, АКОР-1, НГ-203) | Термостойкость до 150°C.<br>Повышение степени антикоррозийной и теплоизоляционной защиты   |
| Стеклянные и/или полимерные  | Эпоксидное связующее.  | Отвердители из группы аминного и амидного типа   | Высокая адгезия к трубе.   |
| Стеклянные микросферы  | Эпоксидная смола.  | Глицидиловый эфир кислот фосфора; отвердитель  | Коэффициент теплопроводности 0,02 – 0,03 Вт/м×К  |
| Алюмо-силикатные   | Натриевое и/или калиевое жидкое стекло.  | -  | Характеризуется плотностью на сжатие до 11 МПа и коэффициентом теплопроводности 0,16 – 0,175 Вт/м×К  |
| Смесь металлизированных и неметаллизированных керамических микросфер   | Стирол-акриловый латекс, натриевое жидкое стекло, низкомолекулярный силиконовый каучук.  | -  | Повышенная защита от теплового и электромагнитного излучения.  |

Окончание таблицы 1

| Наполнители                           | Связующее   | Другие добавки   | Функциональность,<br>макс. температура применения   |
|---------------------------------------|---|--|---|
| Стекланные микро-сферы                | Полиорганосилоксановый блок-сополимер Лестосил СМ (ТУ 38.03.1.006-90) и силоксановый каучук низкомолекулярный СК ТНФ (А ТУ 38-103129-77). | Нитрид бора  | Огнестойкое покрытие.   |
| Керамические и кремниевые микро-сферы | Смесь бутадиен-стирольного каучука и акрилового полимера.   | Углеродистые микроволокна, пигмент (оксид титана, свинцовый крон), вода. | Улучшенная адгезия, прочность на разрыв 2,4 кгс/мм <sup>2</sup> , теплопроводность 2900 – 3400 эрг/(с.см.к).          |
| Зольные микро-сферы                   | Пенополиуретан.   | -  | Плотность 51 кг/м <sup>3</sup> , прочность на сжатие 1,36 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,124 Вт/м×К            |
| Стекланные микро-сферы                | Пенополиуретан.   | -  | Прочность на сжатие до 0,95 МПа. Уменьшение горючести материала по сравнению с ППУ. Плотность 51-75 кг/м <sup>3</sup> |

### 3. Связующие компоненты. Термопласты и термореактивы

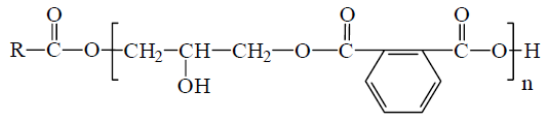
Важнейшей задачей при изготовлении ТМ является подбор связующего. Основные характеристики формируемого композитного материала, такие как диапазон рабочих температур, ударная прочность, водо- и атмосферостойкость, химическая стойкость, преимущественно определяются типом матрицы. В качестве связующих компонентов используют органические, элементоорганические и неорганические полимеры. По типу технологической переработки органические и элементоорганические полимеры можно разделить на два больших класса: термопластичные и термореактивные.

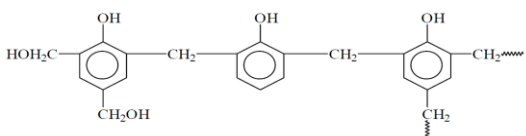
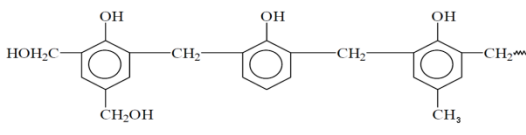
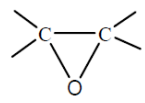
Переработка термопластов основана на их способности при нагревании выше температуры стеклования переходить в эластичное, а выше температуры текучести и температуры плавления - в вязкотекучее состояние и затвердевать при охлаждении ниже температуры стеклования и температуры плавления. Преимуществом термопластов является технологичность переработки, высокая ударная прочность, трещиностойкость, долговечность [22]. К таким связующим относятся: полиолефины, полиэтилен-терефталат, алифатические полиамиды, полиформальдегид, полиимиды и многие другие. Однако термопласты не лишены недостатков, основным из которых является низкая термостойкость [23].

По сравнению с термопластичными термореактивные связующие обладают более широкими возможностями регулирования вязкости, смачивающей и пропитывающей способности. Изделия формируемые из реактопластов характеризуются высокой механической прочностью и теплостойкостью, однако, по ударной вязкости и трещиностойкости, они уступают изделиям из термопластов. Термореактивные связующие характеризуются образованием сетчатых структур в результате полимеризации реакционно-способных олигомеров или низкомолекулярных мономеров. В последнее время широкое распространение получил метод изготовления полимеров на основе реакционно-способных олигомеров. Типичными представителями материалов, получаемых таким путем, являются эпоксидные смолы, полиэфиракрилаты и полиуретаны. Свойства полимерных материалов во многом зависят от распределения по типу функциональности (природа функциональных групп) исходного олигомерного сырья [24]. Особенно чувствительны физико-механические характеристики к наличию в реакционно-способных олигомерах многофункциональных олигомеров, которые создают дефекты в пространственной структуре сетчатого полимера. Так, например, у полиуретанов с увеличением многофункциональной фракции олигомеров снижается модуль упругости, прочность на разрыв и плотность пространственной сетки [24].

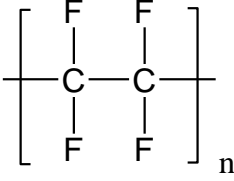
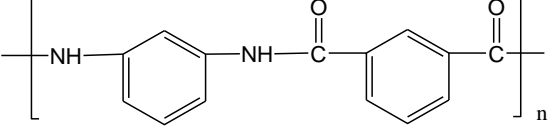
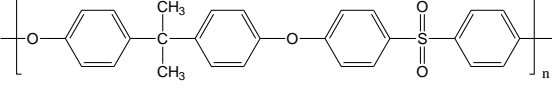
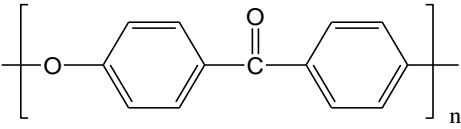
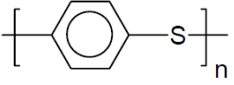
Перспективными связующими для создания теплоизоляционных покрытий являются полимерные матрицы, используемые для приготовления ПКМ [25]. Основные классы органических и элементоорганических полимеров систематизированы нами по химическому строению элементарного звена (таблица 2) [26].

Таблица 2. Характеристики формируемого сырья

| Классы связующих   | Основные характеристики формируемых материалов   |
|--|--|
| 1  | 2  |
| Термореактивные связующие  |  |
| Глифталивые смолы<br> | Медленно отверждение, при комнатной температуре, сопровождающееся значительной усадкой материала и формированием хрупких покрытий. Полученные покрытия обладают антикоррозионными свойствами, хорошей атмосферостойкостью и термостойкостью до 150°C |

| 1   | 2   |
|---|---|
| <p>Олигоэфирмалеинаты</p> $\text{HO} \left[ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} - \text{CH} = \text{CH} - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} - \text{O} \right]_n \text{H}$ | <p>Отверждаются при комнатной температуре. Отличаются хорошей адгезией к стекловолокну, бумаге и металлам. При отверждении наблюдается минимальная усадка покрытий. Покрытия устойчивы до температуры 80 – 100°C</p>  |
| <p>Резольные фенолформальдегидные смолы</p>    | <p>Отверждаются при нагревании до 170 - 180°C с образованием твердого полимеров, стойких к воде, органическим растворителям и кислотам, за исключением серной и азотной кислот. Стабильны при нагревании до 200 - 250°C</p>   |
| <p>Наволачные фенолформальдегидные смолы</p>   | <p>Характеризуются линейным строением молекул. Обычно отверждают при 150 - 200°C в присутствии гексаметилентетрамина (6-14%). Обладают высокой водостойкостью. При температуре выше 280°C начинают постепенно разрушаться</p>   |
| <p>Уретановые смолы (полиуретаны, (ПУ)), на основе уретановой группы вида:</p> $\text{---NH---}\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}\text{---O---}$   | <p>Отверждение достигается при комнатной температуре за 30-150 мин. Не растворяются в воде и традиционных растворителях. Характеризуются высокой адгезией к следующим материалам: ткани, бумага, дерево, стекло, штукатурка, металлы. Стойкость к старению несколько раз выше, чем у искусственного и натурального каучуков. Основной недостаток - горючесть и токсичность выделений. Диапазон рабочих температур изделий содержащих уретановые группы от -50°C до +130°C</p> |
| <p>Эпоксидные смолы, содержат в молекуле не менее двух эпоксидных групп вида:</p>    | <p>Возможно отверждение при комнатной температуре с использованием катализаторов, и при повышенной температур (170 – 220°C в течение 40-20 мин). Покрытия, характеризуются хорошей водо – и химической стойкостью. Термостойкость определяется химическим строением сетки, которое зависит от природы отвердителя и находится в диапазоне 150 - 320°C. Формируемые покрытия отличаются хрупкостью</p>   |
| <p>Кремнийорганические связующие</p> $\left[ \begin{array}{c} \text{R} \\   \\ \text{---Si---O---} \\   \\ \text{R} \end{array} \right]_n$  | <p>Термическое или каталитическое отверждение. Покрытия характеризуются водоотталкивающими свойствами, повышенной термостойкостью, устойчивостью к озону и агрессивным средам. Используются в качестве защиты от коррозии. Эластичность, твердость и прочность силиконовых резин, зависит от степени сшивания мономеров. При низких температурах покрытия сохраняют эластичность, не подвергается старению. Их свойства остаются постоянными до температуры 370°C</p>         |

| 1   | 2  |
|---|--|
| <p>Полиимидные и бисмалеимидные связующие</p>                                        | <p>Полимеризация может быть осуществлена как термически (300 - 350°C в инертной атмосфере), так и химически. Покрyтия представляют сетчатую матрицу с повышенной механической прочностью и термостойкостью. В зависимости от типа взаимодействия между основными цепями могут относиться к термопластам, которые характеризуются повышенной стабильностью 280°C, а кратковременно до 400°C</p>   |
| <b>Термопластичные связующие</b>  |  |
| <p>Полиолефины</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Полиэтилен</li> <li>2. Полипропилен</li> <li>3. Полистирол</li> </ol>                                    | <p>Эластичность полиэтилена зависит от плотности и снижается с её ростом, при этом увеличивается жесткость полимера.<br/>         Полипропилен имеет самую высокую прочность при изгибе среди всех термопластов.<br/>         Полиэтилен и полиэтилен устойчивы к действию воды, водяных паров, органических растворителей, минеральных кислот и щелочей.<br/>         Стирол хороший диэлектрик, обладает низкой теплопроводностью и хрупкостью. Устойчив к действию органических растворителей, концентрированных растворов щелочей и кислот.<br/>         Материалы, получаемые на основе полиолефинов, имеют температуру эксплуатации до 140°C</p> |
| <p>Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)</p>   | <p>Температурный интервал эксплуатации до 170°C. Волокна из ПЭТФ обладают высокой прочностью, эластичностью и химической стойкостью. Пленки на основе ПЭТФ не пропускают пары воды, кислорода, азота и пары растворителей</p>  |
| <p>Алифатические полиамиды, содержат в основной цепи полимера амидную группу:</p>  | <p>Отличаются высокой твердостью, прочностью на изгиб и износостойкостью. Температура эксплуатации до 215°C</p>  |
| <p>Полиакрилаты</p>    | <p>Растворимы в собственных мономерях, сложных эфирах, ароматических и хлорированных углеводородах. Низшие полиакрилаты растворимы в ацетоне и нерастворимы в неполярных растворителях. Температуры размягчения полиакрилатов на основе алифатических дикарбоновых кислот лежат в области 30 - 240°C, а на основе ароматических дикарбоновых кислот в интервале 120 - 350°C. Температура разложения на воздухе составляет 300-350°C</p>  |

| 1   | 2   |
|---|---|
| <p>Фторопласты</p>                 | <p>Температура формования различных марок фторопластов находится в диапазоне 150 - 327°С. Фторопласты характеризуются высокой электрической прочностью, низким коэффициентом трения, стойкостью к агрессивным средам, атмосферо-, коррозионно- и радиационностойкостью, слабой газопроницаемостью, негорючи, нерастворимы во многих органических растворителях и воде</p>                               |
| <p>Ароматические полиамиды</p>     | <p>Относятся к числу наиболее жесткоцепных синтетических полимеров. Размягчаются при температурах 300 – 400°С. Растворимость и теплостойкость ароматических полиамидов зависит от надмолекулярной структуры формируемого полимера. Полимеры данного класса масштабно применяют для производства высокопрочных органических волокон</p>  |
| <p>Полисульфоны</p>               | <p>Обладают стойкостью к радиоактивному излучению, химической стойкостью к растворам щелочей, слабым растворам минеральных кислот, слабым и насыщенным растворам минеральных солей, алифатических углеводородов, моторных и дизельных топлив, нефтяных масел, ПАВ. Перерабатываются при 300 – 380°С</p>   |
| <p>Полиэфиркетоны (ПЭК)</p>      | <p>Наиболее широко используется в промышленности полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) с температурой плавления 340-390°С. Обладает высокой тепло- и огнестойкостью, стойкостью к УФ излучению, горячей воде и пару</p>  |
| <p>Полифениленсульфид (ПФС)</p>  | <p>Характеризуется повышенной жесткостью и ударпрочностью, стабильностью размеров при длительных нагрузках, исключительной химической стойкостью, в том числе к автомобильному и авиационному топливу. Отличаются низким уровнем водопоглощения (до 0,02%). Являются диэлектриком. Покрытия могут работать постоянно при температуре от 60°С до 220°С и выдерживать кратковременный нагрев до 270°С</p> |

В последнее время активно развивается направление гибридных матриц, сочетающих термопластичные и терморезистивные компоненты, что позволяет реализовать преимущества двух основных классов связующих. Композитные материалы на основе представленных полимеров (таблица 1) используются практически во всех областях промышленности: энергетике, авиации, космонавтике, автомобилестроении, судостроении, строительстве производстве бытовой техники, медицине.

Из таблицы 1 видно, что термостабильность органических и элементоорганических полимеров не превышает 400°С. Однако введение специальных добавок приводит к повышению теплостойкости органических полимеров. Например, силиконовые смо-



лы производства Dow Corning модифицированные неорганическими пигментами, такими как алюминиевая паста и окислы металлов могут использоваться в высокотемпературных средах, вплоть до 760 °С [27].

#### 4. Неорганические вяжущие вещества

Помимо органических связующих, одним из недостатков которых является высокая стоимость, синтактные пены получают и на основе неорганических вяжущих веществ [16]. В указанном патенте для связывания зольных микросфер используют жидкое стекло. Применение в качестве матрицы неорганических соединений имеет ряд преимуществ: доступность, низкая стоимость, возможность использование композиционного материала при высоких температурах.

Рассмотрим основной класс минеральных (неорганических) строительных вяжущих соединений. К минеральным вяжущим относятся вещества, способные под влиянием внутренних физико-химических процессов переходить из жидкого или тестообразного состояния в твердое, связывая при этом в единое целое другие компоненты. Вяжущие материалы, применяемые в строительстве, по способу отверждения подразделяют на воздушные вяжущие и гидравлические вяжущие (таблица 3). Воздушные вяжущие материалы способны отвердевать и долго сохранять свою прочность только на воздухе; во влажных условиях они размокают и быстро теряют прочность (например, воздушная известь, гипс, глины) [28].

Таблица 3. Строительные вяжущие материалы

| Неорганические вяжущие   | Способ отверждения           |
|--|------------------------------|
| Известковые (в основе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )   | Воздушный                    |
| Глины ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{SiO}_2$ )   |                              |
| Гибсовые ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ или $\text{CaSO}_4$ )   |                              |
| Магнезиальные (основной компонент $\text{MgO}$ )   |                              |
| Жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ и/или $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ )   |                              |
| Гипсо-цементно-пуццолановое вяжущее вещество (ГЦПВ): 50-75 % строительный гипс, 15-25 % портландцемент, 10-20 % активных минеральных добавок   | Во влажной и воздушной среде |
| Системы, состоящие из соединений четырех оксидов: $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ , к ним также относятся вяжущие этрингитового типа ( $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaSO}_4$ ) |                              |

В системах, состоящих из соединений четырех оксидов (таблица 2), в зависимости от преобладания одного из них выделяют романцемент, силикатные цементы (в том числе портландцемент), алюминатные цементы (глиноземистый цемент) и вяжущие этрингитового типа (расширяющиеся и безусадочные цементы) [29]. Отличительной чертой неорганических связующих является потеря пластично-вязких свойств при «схватывании», то есть формирования структуры с молекулярными связями. В качестве пластифицирующей добавки к цементам используют глину, благодаря ее высокой пластичности и способности удерживать воду на поверхности своих тонкодисперсных частиц.

В последнее десятилетие стремительно возрастает число работ по применению стеклянных полых или алюмосиликатных микросфер в кладочных растворах. В работах [30], [31] обосновано применение полых микросфер с целью снижению плотности и теплопроводности цементного камня, а также облегчения кладочных растворов. Например, в статье [32] описана разработка состава строительных смесей на основе полых алюмосиликатных и стеклянных микросфер. Было найдено, что оптимальная плотность ( $\leq 600 \text{ кг/м}^3$ ) и коэффициент теплопроводности ( $0,16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) достигается при выборе в качестве наполнителя полых стеклянных микросфер. Авторам статьи [33] удалось получить цементный кладочный раствор плотностью в сухом состоянии  $400 \text{ кг/м}^3$  при вве-

дении полых стеклянных микросфер до 50%. В работе [34] для увеличения адгезионной прочности цементно-минеральной матрицы, содержащей полые стеклянные микросферы, разработан комплексный наноразмерный модификатор. Предложенный модификатор позволяет структурировать бетонную смесь, увеличить сцепление на границе раздела фаз матрица-микросферы и повысить вязкость системы, обеспечивая однородность распределения наполнителя по объему. Материалы, описанные в рассмотренных работах, нашли применение в строительной отрасли.

Сегодня все больше возрастает потребность в эффективных современных высокотемпературных теплоизоляционных материалах [35]. Для высокотемпературных объектов используют фосфатные связующие, называемых в технике «связки». Такие соединения относятся к концентрированным водным растворам неорганических полимеров, которые относятся к неорганическим клеям [36]. По структуре растворов типовых связок выделяют две группы: 1) растворы щелочных силикатов и алюмосиликатов, 2) растворы фосфатов. На российском рынке представлен широкий ассортимент огнеупорных клеев, как на основе фосфатных связок (АФС, АБФК, АХФС), так и на основе алюмосиликатов (КОЗ-3, НС-Ш, НС-1). Неорганические клеи обладают рядом преимуществ: не токсичны, пожаро-, взрывобезопасны, характеризуются кислотоупорными и защитными свойствами, а также высокой рабочей температурой – до 2000°C. Для придания клеям или изделиям на их основе способности работать в условиях высоких температур в связку вводят дополнительные огнеупорные наполнители, такие как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с размером зерен 1 мкм [36].

Авторами работы [37] была получена сырьевая смесь для изготовления теплоизоляционных изделий, включающая фосфатное связующее, глиноземсодержащий компонент и в качестве заполнителя фосфатные микросферы. Температура эксплуатации полученного состава составила 1200°C. Алюмохромфосфатное связующее (АХФС) используют в качестве пленкообразующего компонента. Так, в патенте [38] описан огнезащитный состав на основе АХФС, отвердитель ОСА-1 и стеклянные микросферы. Данный состав обладает улучшенными технологическими свойствами, в частности, способностью к вспучиванию при повышенных температурах.

Известно получение жаростойкого фосфатного материала переменной плотности [39]. Жаростойкие материалы переменной плотности разработаны за счет послойного введения наполнителей, в качестве которых были отобраны шамот, отработанный катализатор ИМ-2201 и алюмосиликатные микросферы. Особенностью приготовленного данного состава является самопроизвольное затвердевание в режиме изотермического синтеза за счет введения алюминиевой пудры или алюминиевого порошка.

Использование фосфатных и алюмосиликатных связок для изготовления теплоизоляционных материалов на основе микросфер недостаточно изучено на сегодняшний день. Вместе с тем является очевидным перспективность их применения в композиционных материалах с целью расширения диапазона рабочих температур ТМ. Поэтому представляет интерес их дальнейшее изучение.

### **Дискуссия**

Существует мнение специалистов, что практически все применяемые на сегодняшний день традиционные теплоизоляционные материалы подвержены быстрому старению и разрушению, реальный срок их эксплуатации, как правило, не превышает десяти лет [39]. Поэтому объективно существует необходимость в поиске и применении новых теплоизоляционных материалов, одними из которых являются синтактные пены. Есть все основания утверждать, что синтактные пены в ближайшее время будут широко востребованы и станут конкурентоспособными на рынке теплоизоляционных материалов.

## Заключение

Использование микросфер в структуре синтактных пен определяет их теплоизолирующие свойства, обеспечивает снижение плотности и теплопроводности материала.

Связующие вещества в составе синтактных пен обеспечивают механическую прочность и термостабильность теплоизоляционного покрытия. Преимуществом использования термопластов в качестве связующих является технологичность их переработки, высокая ударная прочность, трещиностойкость, долговечность. Ограничением их использования в теплоизоляционных конструкциях трубопроводов и энергетического оборудования является относительно низкая термостойкость (~ 200 °С). Термореактивные связующие характеризуются высокой механической прочностью и термостойкостью, однако, по ударной вязкости и трещиностойкости, они уступают изделиям из термопластов. Термостабильность органических и элементоорганических полимеров не превышает 400°С. Однако введение специальных добавок приводит к значительному повышению термостойкости органических полимеров. Высокая термостойкость (до 2000°С) фосфатных и алюмосиликатных связок делает их весьма перспективными для использования в теплоизоляционных конструкциях трубопроводов и энергетического оборудования, однако требует дополнительных исследований.

## Благодарности

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Соглашения №14.574.21.0022 от «17» июня 2014 г. «Разработка теплоизоляционных композитных материалов для обмуровки теплоэнергетического оборудования с использованием автономных мобильных высокопроизводительных установок» (Уникальный идентификационный номер RFMEFI57414X0022).

## Список использованных источников

1. John, B., & Reghunadhan Nair, C. P. (2014). *Handbook of Thermoset Plastics. Handbook of Thermoset Plastics* (pp. 511–554). doi:10.1016/B978-1-4557-3107-7.00013-0
2. Корельштейн Л. Жидкая теплоизоляция – мнимая эффективность // CADmaster. 2011. # 3. С. 14-16
3. Bing Li. Effect of microstructure and physical parameters of hollow glass microsphere on insulation performance // *Material Letters*. 2011. V. 65. # 12. P. 1992-1994.
4. Логинова Н.А. Определение эффективности тонкопленочных теплоизоляционных покрытий применительно к системам теплоснабжения: дис. канд. тех. наук: 05.14.04 / Логинова Наталья Арамовна. - М., 2010. - 133 с. Liao Y., Wua X., Liua H., Chen Y. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres // *Thermochimica Acta*. 2011. V.526. P. 178-184.
5. Теплоизоляционная композиция: пат. 2414495 РФ / Варламова Л. П., Варюхин В. А., Домрачев Г. А., Дрожжин В.С., Егоров В. А., Извозчикова В. А., Обьедков А. М., Пикулин И. В., Рябов С. А., Семенов Н. М.; опубл. 2006.
6. Завьялова Н. Б., Строганов В. Ф., Строганов И. В., Ахметшин А. С. Исследование влияния природы наполнителей на прочностные свойства гетерофазных полимерных составов // *Известия КГАСУ*. 2007. Т. 1. # 7. С. 63–66.
7. Katz H.S., Milewski J.V. *Handbook of fillers and reinforcements for plastics*. New York: Van Nostrand Reinhold Co. 1978. 652 с.
8. Deepthi, M. V., Sharma, M., Sailaja, R. R. N., Anantha, P., Sampathkumaran, P., & Seetharamu, S. (2010). Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene fly ash Cenospheres composites. *Materials and Design*, 31, 2051–2060. doi:10.1016/j.matdes.2009.10.014

9. Wang, C., Liu, J., Du, H., & Guo, A. (2012). Effect of fly ash cenospheres on the microstructure and properties of silica-based composites. *Ceramics International*, 38, 4395–4400. doi:10.1016/j.ceramint.2012.01.044
10. Покрытие жидкокерамическое изоляционное: патент РФ № 2342415 / Мотрикалэ Н.В.; опубл. 2007.
11. Антикоррозионное и теплоизоляционное покрытие на основе полых микросфер: пат. 2251563 РФ / Беляев В. С.; опубл. 2003.
12. Применение композиций, наполненной полыми микросферами, в качестве антикоррозионного и теплоизоляционного покрытия трубопроводов: пат. 2304600 / Беляев В. С.; опубл. 2006.
13. Способ получения теплоизоляционного материала на основе синтактной пены, теплоизолированная труба и способ нанесения теплоизоляционного покрытия на внешнюю поверхность трубы: пат. 2187433 РФ / Телегин В. А., Телегина Е. Б., Горев В. А., Шестаков С. П., Ремизов В. В., Михайлов Н. В., Тимонин В. И., Газиянц А. П.; опубл. 1999.
14. Способ получения теплоизоляционного градиентного покрытия: пат. 2424905 РФ / Амирова Л. М., Андрианова К. А., Рыбаков В. В., Овчинников Е. В., Амирова Л. Р.; опубл. 2009.
15. Способ получения конструкционно-теплоизоляционного строительного материала на основе алюмосиликатных микросфер: пат. 2455253 РФ / Бессонов И. В., Сепелин А. Н., Кордюков Н. П.; опубл. 2006.
16. Теплоизоляцион-ное покрытие: пат. 2473751 РФ / Гринавцев В. Н., Гринавцев О. В., Черногиль В. Б.; опубл. 2006.
17. Способ получения огнестойкого покрытия: пат. 2039070 РФ / Епифановский И. С., Дмитриенко Ю. И., Полежаев Ю. В., Ю. В.Медведев, Михатулий Д. С.; опубл. 1993.
18. Жидкое теплоизоляционное покрытие: пат. 2206550 РФ / Основин Е.В.; опубл. 2001.
19. Теплоизоляционная композиция: пат. 2279414 РФ / Маркин В.Б., Ананьева Е.С., Крюков А.С.; опубл. 2005.
20. Теплоизолирующая композиция на основе жесткого пенополиуретана: пат. 2226202 РФ / Гавриков Ю. М., Масик И. В., Сиротиинкин Н. В., Яценко С. В.; опубл. 2011.
21. Mascia L. Thermoplastics: Materials Engineering. Elsevier A. 1989. P. 537.
22. Engineering Thermoplastics: Properties and Applications. Taylor & F / ed. Margolis G.M. 1985. P. 408.
23. Entelis S.G., Evreinov V. V., Kuzaev I.A. Reactive Oligomers. New concepts in polymer science. VSP. 1989. P. 322.
24. Harris B. Engineering Composite Materials. IOM. Great Britain, 1999. P. 317.
25. Lubin G. Handbook of composites. New York: Van Nostrand Reinhold Company. 1982. 776 с.
26. Dow Corning. Resins and intermediates. Selecrion Guide. [Online]. 2004. P. 8. URL: [http://www.rishichem.com/uploads/products/docs/file\\_15.pdf](http://www.rishichem.com/uploads/products/docs/file_15.pdf).
27. Волженский А. В., Буров Ю., Колокольников В. С. Минеральные вяжущие вещества: технология и свойства. М.:Стройиздат. 1979. 476 с.
28. Odler I. Special Inorganic Cements. CRC Press. 2003. P. 416.
29. Kumar S. Fly ash–lime–phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions // Build. Environ. 2003. Vol. 38, № 2. P. 291–295.
30. Kumar S. Fly ash-lime- phosphogypsum cementitious binder: A new trend in bricks // Mater. Struct. 2000. Vol. 33. P. 59–64.

31. Розовская Т. А., Семенов В.С. Облегченная сухая кладочная смесь с полыми микросферам // Строительные материалы, изделия и санитарная техника. 2013. Т. 49. С. 181–185.
32. Кириллов К. И., Семенов В. С. Сверхлегкие кладочные растворы // Вестник МГСУ. 2009. Т. 3. С. 106–112.
33. Иноземцев А. С., Королев Е. В. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. Т. 10. С. 80–83.
34. Суворов С. А. Современные проблемы производства огнеупорных материалов для металлургической промышленности // Новые огнеупоры. 2002. Т. 3, С. 38–45.
35. Сычев М. М.. Неорганические клеи. СПб.: Химия, 1986. 152 с.
36. Сырьевая смесь для изготовления теплоизоляционных изделий: пат. 753824 РФ / Данилова Т. А., Дудеров Ю. Г., Фехретдинов Ф. А.; опубл. 1980.
37. Огнезащитный состав для металлоконструкций: пат. 2422489 Р.Ф. / Михлай В. Н., Афанасьев С. В., Рощенко О. С., Кузьмин И. В.; опубл. 2009.
38. Пак Ч. Г., Абызов В. А., Батрашов В. М. Жаростойкие фосфатные ячеистые материалы переменной плотности // Вестник ЮУрГУ. Серия Строительство и архитектура. 2010. Т 15. С. 4–5.
39. Иванов В.В., Букаров Н.В., Василенко В.В. Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс // Электронный журнал «Энергосвет». 2010. # 7 (12).