

Синтез пенного материала на основе золя кремниевой кислоты для гражданского и военного назначения

УДК 623.77

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0026>

Номер статьи: C0026

Шашков Алексей Иванович

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
факультет инженерного и электромеханического обеспечения, начальник лаборатории
Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2439-0049

Alekseyshashkov@internet.ru

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой строительные материалы и технологии

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

Amsychova@yandex.ru

Нестеров Олег Сергеевич

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

адъюнкт, 42 кафедра

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4534-7993

Nesterovoleg@gmail.ru

Статья получена: 01.11.2025. Одобрена: 17.11.2025. Опубликована онлайн: 25.12.2025. © РИОР

Аннотация. Целью данной статьи является рассмотрение вопроса о обеспечении требуемого теплового состояния объекта. Показать учет новых механизмов распределения тепловых потоков и стабилизации пенного каркаса, обеспечивающих требуемое тепловое состояние объекта. Разработка методики синтеза пенного материала на основе золя кремниевой кислоты для теплоизоляции и снижения тепловой заметности объектов. В работе были использованы методы исследования физико-механических характеристик материала, метод конечных элементов, рентгенофазовый, дериватографический и микроскопический методы анализа. Получена близкая сходимость теоретических и экспериментальных исследований. Разработана методика синтеза пенного материала на основе золя кремниевой кислоты, которая приводит к упрочнению пенного каркаса на 23% в течение 9 месяцев твердения. Показано, что использование макро- и микрофибры в составе материала приводит к снижению ширины раскрытия трещин и увеличению кратности пены. С помощью метода конечных элементов проведено моделирование распределения тепловых потоков на объекте в масштабе 1:1, которое подтвердило обеспечение требуемого теплового состояния. Показано, что использование разработанного материала позволяет обеспечить требуемое тепловое состояние объекта по сравнению с существующими пенными покрытиями и минеральной ватой. Предложено новое техническое решение, обеспечивающее качественное распределение фиброволокна в объеме материала за счет новой конструкции пенообразующего патрона.

Ключевые слова: золь кремниевой кислоты, золь-гель переход, пенные материалы, теплоизоляция, тепловое состояние, пенообразующий патрон.

Synthesis of a Silica Sol-Based Foam Material for Civil and Military Applications

Shashkov Aleksei Ivanovich

Candidate of Technical Sciences,
A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
Faculty of Engineering and Electromechanical Support, Head of Laboratory
Saint Petersburg, Russia
Alekseyshashkov@internet.ru

Sycheva Anastasiia Maksimovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Head of the Department of Construction Materials and Technologies
Saint Petersburg, Russia
Amsychova@yandex.ru

Nesterov Oleg Sergeevich

A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
adjunct, Department 42
Saint Petersburg, Russia
Nesterovoleg@gmail.ru

Abstract. The purpose of this article is to examine the issue of ensuring the required thermal state of an object. To demonstrate the use of new mechanisms for heat flow distribution and foam stabilization, ensuring the required thermal state of an object. To develop a method for synthesizing a foam material based on silica sol for thermal insulation and reducing the thermal signature of objects. The study utilized methods for studying the physical and mechanical properties of the material, including finite element analysis, X-ray diffraction, derivatographic, and microscopic analysis. Close agreement between theoretical and experimental studies was achieved. A method for synthesizing a foam material based on silica sol was developed. This method results in a 23% strengthening of the foam framework over a 9-month curing period. The use of macro- and microfibers in the material was shown to reduce crack width and increase foam expansion. Using the finite element method, heat flow distribution across the object was simulated at a 1:1 scale, confirming that the required thermal state was achieved. The developed material was shown to provide the required thermal state for the object compared to existing foam coatings and mineral wool. A new technical solution is proposed that ensures high-quality fiber distribution within the material due to a new foam cartridge design.

Keywords: silica sol, sol-gel transition, foam materials, thermal insulation, thermal state, foaming cartridge.

Введение

Пенные материалы на основе золя кремниевой кислоты (SiO_2) представляют собой пористые структуры с высокой удельной поверхностью и низкой плотностью, синтезируемые золь-гель методом. Этот процесс, основанный на гидролизе и конденсации аллоксидов кремния, позволяет создавать материалы с контролируемой пористостью, что делает их перспективными для теплоизоляции и снижения теплового состояния в инфракрасном диапазоне (3,5–5,5 и 8–14 мкм) [1]. В работе исследован объект, где

требуется минимизация теплового контраста ($\Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$) при тепловыделениях до 400 кВт, пенные покрытия на основе золя SiO_2 обеспечивают теплопроводность $\lambda \leq 0,025 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ и долговечность более 5 лет, превосходя аналоги, такие как пенобетон ($\lambda = 0,038\text{--}0,073 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$) или минеральная вата ($\lambda = 0,042 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$): Табл. 1.

Таблица 1

Характеристики существующих теплоизоляционных материалов пониженных плотностей

Авторы	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Вид материала	Вид вяжущего	Коэффициент теплопроводности $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Технология получения
Иващенко Ю.Г.	125	неавтоклавный пенобетон	портландцемент	0,052	классическая
Сычева А.М. Елисеева Н.Н.	200			0,04	классическая
Славчева Г.С. Макарова Т.В	200			0,046	классическая
Тысячук В.В., Свинарев А.В.	250			0,055	баротехнология
Чжэньсин ДУ Вэнъцян Цзо	200			0,038	баротехнология
Вэй Ше, Цзяпин Лю	250			0,051	классическая
Э. Кирсли, Пи Джей	250			0,054	классическая
Эрика Холт Паула Райвио	300			0,073	классическая
ГОСТ 9573-2012	40-70	Мин. вата	фенолспирты, карбамидные смолы	0,42	создание волокнистого каркаса

Традиционные методы синтеза пен, включая механическое вспенивание и эмульсионные шаблоны, не обеспечивают стабильности пенного каркаса при длительной эксплуатации [2]. Золь-гель подход, напротив, стабилизирует пену через уплотнение геля, минимизируя вытекание жидкости и трещинообразование¹. Актуальность исследования заключается в несовершенстве методик синтеза пенных материалов на основе органоминеральных связующих, а также технических и технологических решений их получения. Цель исследования — разработка методики синтеза пенных материалов на основе золя SiO_2 с экспериментальной верификацией результатов. Для достижения поставленной цели решена научная задача, заключающаяся в разработке методики синтеза пенных покрытий с учетом новых механизмов распределения тепловых потоков и стабилизации пенного каркаса, обеспечивающей требуемое тепловое состояние объекта в заданный период эксплуатации.

Выбор компонентов

Золь SiO_2 характеризуется способностью переходить в гель в результате чего жидкая фаза становится гелеобразной. Такой переход и уплотнение геля за счет выделения

¹ Шилова О.А. Золь-Гель технология микро- и нанокомпозитов. Учебное пособие / Под. ред. О.А. Шиловой. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 304 с.

молекул воды в окружающую среду приводит к снижению его коэффициента теплопроводности на порядок (Рис. 1).

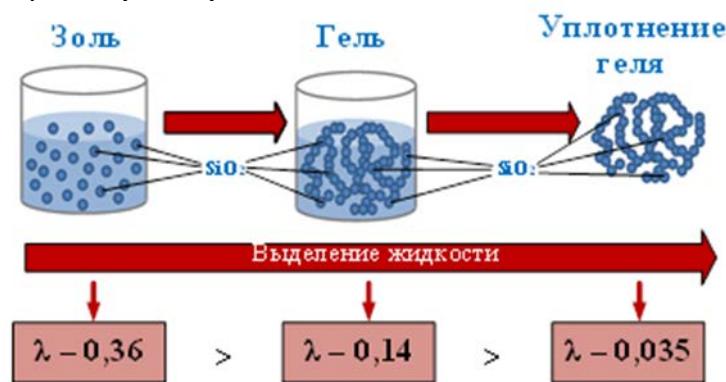


Рис. 1. Повышение теплозащитных свойств при золь-гель переходе

Изменение коэффициента теплопроводности при золь-гель переходе рассчиталось по формуле Ван Флека [3].

Предполагается, что при использовании золя SiO_2 как основного компонента для синтеза пенного материала и его последующее уплотнение в пенном каркасе приведет к снижению коэффициента теплопроводности всего покрытия и снизит тепловую заметность объекта.

В работе предложено ввести в состав полимерные микросфера, представляющие собой маленькие сферические полые шарики из пластика с заключенным в них газом — изобутаном, коэффициент теплопроводности которого на 32% ниже, чем у воздуха (Рис. 2). Это должно снизить скорость прохождения тепловых потоков через пенный материал и коэффициент его теплопроводности.

В работе предложено ввести в состав МПП1 алюминиевую пудру с высоким коэффициентом отражения $k_{\text{отр Al}} \geq 0,94$, что позволит отразить, переотразить и замедлить часть тепловых потоков в объеме пенного материала (Рис. 3) и снизить коэффициент его теплопроводности.

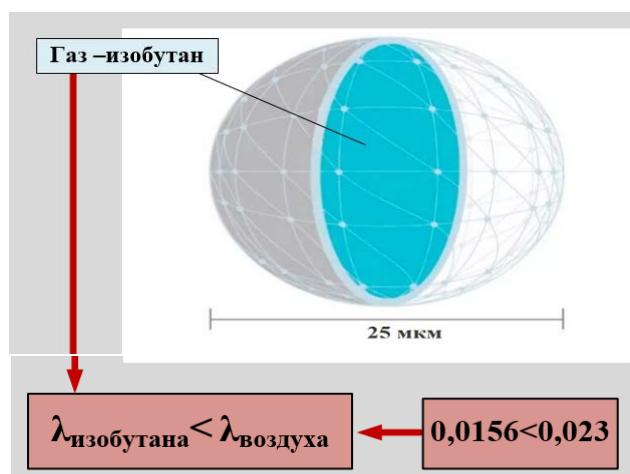


Рис. 2. Полимерная микросфера

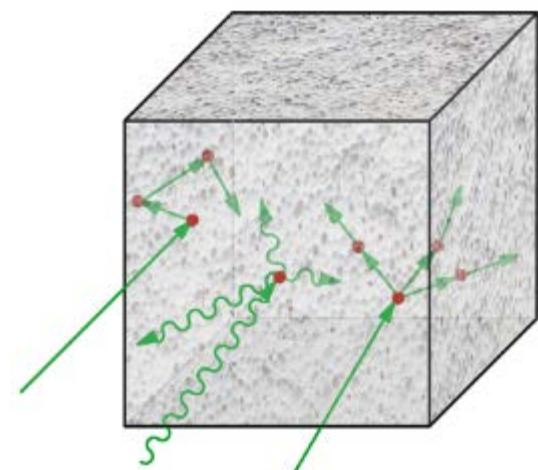


Рис. 3. Отражение и переотражение тепловых потоков в объеме МПП1 при введении алюминиевой пудры

Использование в составе компонентов с разными механизмами воздействия на проходящие тепловые потоки приведет к снижению коэффициента теплопроводности пенного материала и позволит скрыть тепловое состояние объекта [4].

Далее проводился количественный подбор компонентов с последующим изготовлением образцов пенного материала и экспериментальным определением температуры на поверхности макета объекта с нанесенным покрытием.

Для этого была проведена съемка и анализ тепловой сигнатуры макета объекта с использованием тепловизора.

Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента была изготовлена масштабированная модель объекта, представляющая собой однопролетный каркас. В качестве основания покрытия выступает ПВХ тент толщиной 0,3 мм с влагоотталкивающей пропиткой. Размеры модели объекта соответствуют масштабу $M = 1:60$ по отношению к реальному объекту.

Покрытия наносились на макет объекта слоем 5 см.

Порядок экспериментального получения пенного материала следующий:

1. Дозирование компонентов;
2. Смешивание компонентов до получения однородного пенообразующего раствора;
3. Взбивание пенообразующего раствора лабораторным миксером (не менее 3 мин.);
4. Определение кратности пенного материала.

Для имитации тепловых выделений использовался нагревательный прибор с электрическим управлением, позволяющий повышать температуру внутри макета. На внутренней поверхности макета устанавливался выносной датчик температуры, использовался тепловизор «Fluke TI200». Полученные снимки тепловой сигнатуры анализировались на предмет фиксации температурных значений в различных точках.

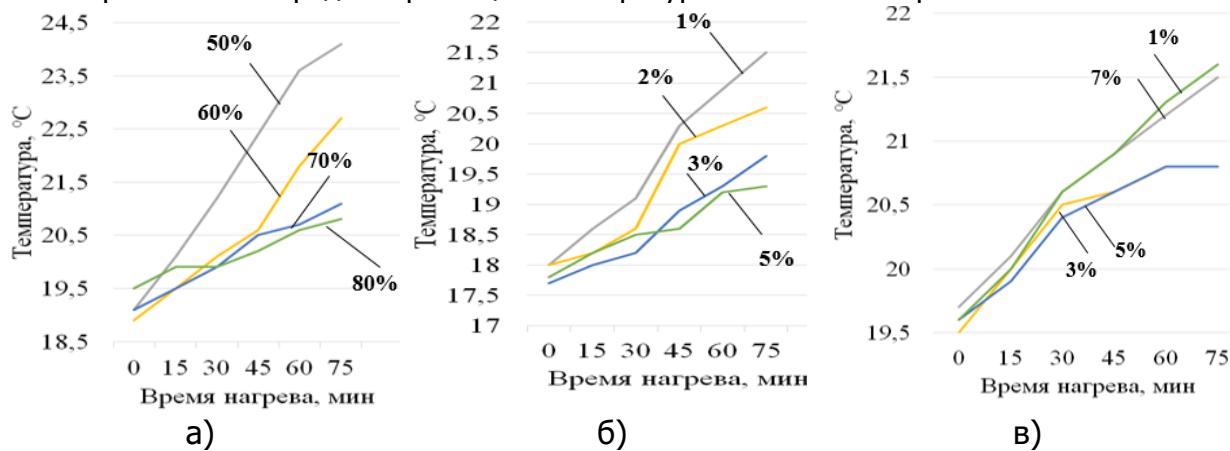


Рис. 4. Зависимости изменения температуры на поверхности макета объекта от количества введенных в состав компонентов:
а) золь SiO_2 ; б) полимерные микросферы; в) алюминиевая пудра

На Рис. 4 показаны зависимости изменения температуры на внешней поверхности макета объекта от количества введенных компонентов, полученные по предварительным экспериментальным данным.

Из Рис. 4 видно, что оптимальное для количества золя SiO_2 — 80% (но поскольку такая концентрация не обеспечивает $k \geq 10$, то количество золя SiO_2 снижается до 70%), алюминиевой пудры — 5% и полимерных микросфер — 3%.

$$\lambda_1 = -0,190 - 0,106 \cdot \varphi_{\text{сфер}} - 0,121 \cdot \varphi_{\text{золя}} - 0,763 \varphi_{\text{Al}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{сфер}}$ — массовая доля полимерных микросфер;

$\varphi_{\text{золя}}$ — массовая доля золя SiO_2 ;

φ_{Al} — массовая доля алюминиевой пудры.

По полученным данным были рассчитаны коэффициенты теплопроводности пенного материала в зависимости от количества вводимых компонентов. Полученные значения

являлись исходными данными для разработки эмпирической зависимости коэффициента теплопроводности от введенных в состав компонентов, (1).

Далее в работе разработанная зависимость будет использоваться в трехмерном уравнении нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье) с внутренними распределенными источниками тепла [5,6] при моделировании и расчете распределения тепловых потоков на объекте в масштабе 1:1.

Обеспечение долговечности

Далее было необходимо подобрать такие компоненты, которые обеспечат возможность дальнейшего твердения пенного материала во времени и сохранят полученные свойства в период срока эксплуатации объекта.

Основная идея заключается в том, что для обеспечения долговечности пенного материала нужно повысить устойчивость пенного каркаса, определяющуюся вытеканием 50% жидкости из пенной пленки, после чего происходит ее разрушение. Если ввести в состав золь SiO_2 , который будет обеспечивать процессы твердения в пенном каркасе при золь-гель переходе (уплотнение и упрочнение геля SiO_2 за счет выделения молекул воды), то это будет приводить: 1) к уменьшению количества вытекающей жидкости из пенной пленки вплоть до нуля; 2) к дальнейшему набору прочности пенного материала в эксплуатации объекта.

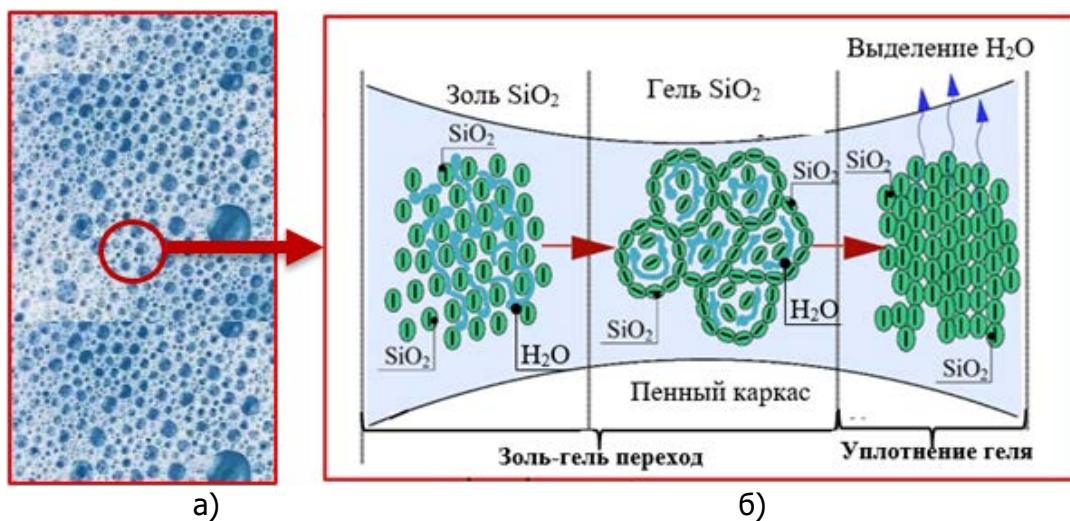


Рис. 5. Образование прочного пенного каркаса при золь-гель переходе: а) пенные пузырьки в объеме материала; б) каркас пенного пузырька

На Рис. 5 показано упрочнение пенного каркаса при переходе золя SiO_2 в гель. Процессы твердения сопровождаются связыванием молекул воды, что препятствует вытеканию жидкости из пенной пленки и предотвращает разрушение пены.

Кроме этого, с целью повышения прочности пенного каркаса в начальный момент времени в состав предложено ввести оксид цинка поскольку он может упрочнить пенную пленку за счет образования с белком пенообразователя прочного комплексного соединения (Рис. 6).

Из работ Шиловой О.А. известно, что в процессе уплотнения и упрочнения геля во времени (за счет выделения молекул воды) образуются трещины, которые могут повысить коэффициент теплопроводности. Для нивелирования этого процесса в работе предложено в состав ввести базальтовую фибрю с длиной волокна 6,4 мм (макрофибра) [7]. Такой размер является оптимальным с точки зрения армирования пенного материала и должен значительно снизить ширину раскрытия трещин в нем.

С целью обеспечения требуемой кратности пены в состав была введена базальтовая фибра с длиной волокна 100-500 мкм (микрофибра). Введение микрофибры при взбивании

должно разбить часть связей, образовывающихся при золь-гель переходе и увеличить пенообразующую способность и кратности пены.

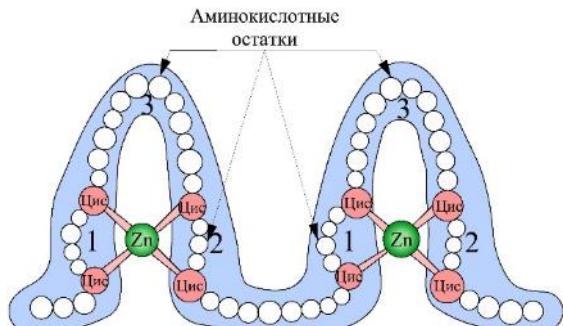


Рис. 6. Комплексное соединение оксида цинка с компонентами белкового пенообразователя (аминокислотные остатки) в пенном каркасе

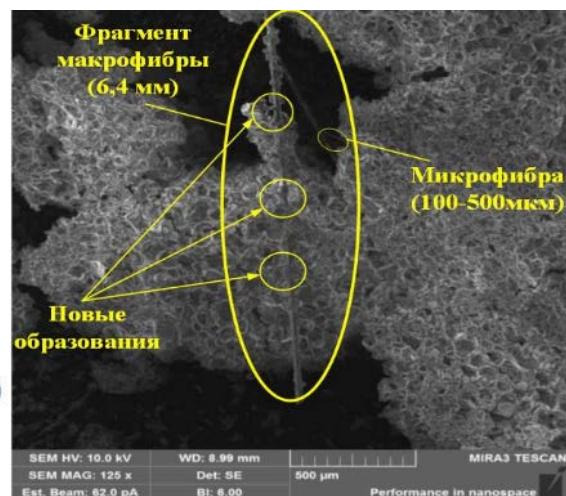


Рис. 7. Результаты электронной микроскопии образцов

На Рис. 6 показаны результаты проведенной электронной микроскопии образца из которых видны новообразования на поверхности макрофибры. На поверхности микрофибры новообразования отсутствуют, так как она не покрыта замасливателем.

В Таблице 2 показан набор прочности пенного материала во времени

Таблица 2

Набор прочности пенного материала σ , кг/см²

3 месяца	6 месяцев	9 месяцев
1,7	2,0	2,1

Далее в работе с целью подтверждения высказанных идей были проведены исследования фазового состава образцов ИК-Фурье спектроскопия [8] (Рис. 8).

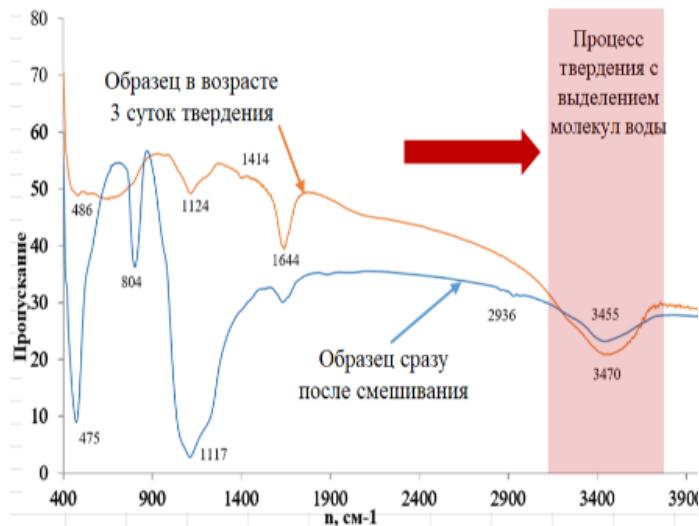


Рис. 8. ИК-спектры образцов

Из Рис. 8 видно, что полосы поглощения в области 3447 см⁻¹ (характеризуют H₂O в составе образцов) уменьшаются к трем суткам твердения по сравнению с образцами, обработанными сразу после смешивания, что говорит о выделении воды в окружающую среду при уплотнении геля. Присутствие молекул воды подтверждают высказанные предположения о возможности продолжения процессов упрочнения во времени, обеспечивающих сохранение полученных свойств в период эксплуатации объекта.

Технические решения

Новое техническое решение связано с получением пенного материала в состав которого входит макрофибра. Существующие средства получения препятствуют прохождению макрофибры и ведут к ее неравномерному распределению в их объеме за счет конструкции пенообразующего патрона. В связи с этим в работе предложено получение в пеногенераторе (используется для получения строительных пен, Рис. 9), с новым устройством пенопатрона (Рис. 10), в котором пенорассекающие элементы, имеют консольное закрепление и расположены под углом к стенкам пенопатрона. Это позволяет макрофибре беспрепятственно проходить через всю длину патрона, равномерно распределиться в объеме материала и как следствие не превысить требуемую ширину раскрытия трещин ($b_{tr} \leq 0,2\text{мм}$).



Рис. 9. Пеногенератор

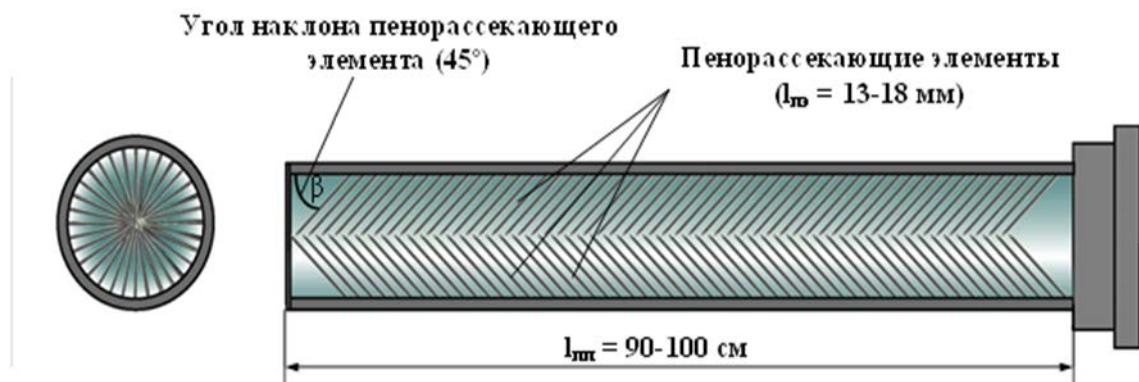


Рис. 10. Пенопатрон

Далее в работе с помощью метода конечных элементов² было проведено моделирование тепловых воздействий с применением в качестве теплоизоляционного слоя пенного материала, которое включало: моделирование параметров тепловых воздействий, моделирование пенного материала, построение сетки конечных элементов, определение условий однозначности и определение времени теплового воздействия.

² Даутов Р.З., Карчевский Р. З. Введение в теорию метода конечных элементов / Учебное пособие. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, 2004. 239 с.

При моделировании расчет тепловых потоков производился по трехмерному уравнению нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье) [5, 6] с распределенными локальными источниками тепла с учетом разработанной эмпирической зависимости (1):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum q_w(x, y, z, \tau), \quad (2)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); τ — время, мин; T — температура, К; λ — коэффициент теплопроводности, принимаемый по разработанной эмпирической зависимости (1), Вт/м·°C; q_w — мощность тепловых воздействий, Вт.

Выводы

Разработанная методика синтеза пенных материалов на основе золя SiO₂ обеспечивает теплопроводность $\lambda \leq 0,025$ Вт/м·К, долговечность более 5 лет, подтвержденные экспериментами и моделированием. Интеграция золь-гель перехода с механическим вспениванием открывает возможности для теплоизоляции и снижения тепловой заметности. Дальнейшие исследования должны фокусироваться на оптимизации для масштабирования и экологичности.

Список литературы

1. Мурашов М.В., Панин С.Д. Распознавание объектов в инфракрасном диапазоне. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 88 с.
2. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975. С. 61-69.
3. Van Vlack D.H. Materials Science for Engineers. Ontario: Univ. Michigan Press, 1974. 472 p.
4. Степанов В.В. и др. Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов / В.В. Степанов В.В., Ю.К. Петреня, А.М. Андреев, А.М. Костельов, Э.Р. Маннанов, В.А. Талалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2018. Т. 11. № 4. С. 85-94.
5. Петрова И.В., Тюлина А. К. Решение уравнений математической физики методом Фурье. М.: РГУ нефти и газа, 2018. 93 с.
6. Симонов Б.В., Симонова И. Э. Преобразования двойных рядов Фурье. Волгоград : ВолгГТУ, 2019. 110 с.
7. Амерханова Г.И., Кияненко Е.А., Зенитова Л.А. Базальтовое волокно – наполнитель полиуретанов // Вестник технологического университета. 2020. № 8. С. 24-29.
8. Смит А. Прикладная ИК спектроскопия. М., 1982. 328 с.

References

1. Murashov M.V., Panin S.D. Object Recognition in the Infrared Range. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2008. 88 p.
2. Tikhomirov V.K. Foams. Theory and Practice of Their Production and Destruction. Moscow: Chemistry, 1975. pp. 61-69.
3. Van Vlack D.H. Materials Science for Engineers. Ontario: Univ. Michigan Press, 1974. 472 p.
4. Stepanov V.V. et al. Influence of the properties of components on the effective thermal conductivity of polymer composite materials / Stepanov V.V., Petrenya Yu.K., Andreev A.M., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Talalov V.A.// Scientific and technical statements of SPbSPU. Physical and mathematical sciences, 2018. Vol. 11. No. 4. Pp. 85-94.
5. Petrova I.V., Tyulina A.K. Solution of equations of mathematical physics by the Fourier method. Moscow: Russian State University of Oil and Gas, 2018. 93 p.
6. Simonov B.V., Simonova I.E. Transformations of double Fourier series. Volgograd: VolGTVU, 2019, 110 p.
7. Amerkhanova G.I., Kiyanenko E.A., Zenitova L.A. Basalt fiber as a filler for polyurethanes // Bulletin of the Technological University. Kazan. No. 8, 2020. Pp. 24-29.
8. Smith A., Applied IR Spectroscopy. Moscow, 1982. 328 p.