

Обзорная статья

УДК 621.396.93:614.8

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28405>



А.В. Федюхин¹, И.Г. Ахметова², С.А. Соловьев² ✉

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия;

² Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия

✉ solovev.sa@kgeu.ru

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Аннотация. Стратегия повышения эффективности и экологичности систем теплоснабжения должна базироваться на снижении потребления тепловой энергии конечным потребителем, а также снижении потерь при производстве и передаче тепловой энергии. Одно из актуальных направлений исследования – разработка теплоизоляционных материалов с высокими теплоизолирующими свойствами. Данная работа посвящена исследованию и сравнению свойств теплоизоляционных материалов, а также проблем, возникающих при их монтаже и эксплуатации. В качестве примера рассмотрена минеральная вата и аэрогель. Изучена перспектива замены высокотемпературной тепловой изоляции, широко применяющейся в промышленности, на современный материал, разработанный на базе аэрогеля. Температурный градиент по толщине теплоизоляции был рассчитан с помощью численного инструмента, разработанного в ANSYS. Результаты показывают, что аэрогель превосходит минеральную вату по всем ключевым теплофизическим характеристикам. В то же время единственным препятствием для широкого промышленного производства и использования аэрогеля в сегменте высокотемпературной теплоизоляции является его рыночная стоимость, которая все еще в несколько раз выше, чем у минеральной ваты при эквивалентных теплоизоляционных характеристиках.

Ключевые слова: высокотемпературная тепловая изоляция, аэрогель, теплопроводность, численное моделирование, эксперимент.

Благодарности: Данное исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-01262-22-01 от 28 января 2022 года (Дополнительное соглашение 075-03-2022-151/1 от 31 января 2022 года).

Для цитирования:

Федюхин А.В., Ахметова И.Г., Соловьев С.А. Анализ эффективности применения современных теплоизоляционных материалов для высокотемпературных трубопроводов // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28405>



A.V. Fedyukhin¹, I.G. Akhmetova², S.A. Solovev² ✉

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, Russia;

² Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

✉ solovev.sa@kgeu.ru

EFFICIENCY ANALYSIS OF MODERN HEAT-INSULATING MATERIALS FOR HIGH-TEMPERATURE PIPELINES

Abstract. The strategy for improving the efficiency and environmental friendliness of heat supply systems should be based on reducing the consumption of thermal energy by the end consumer, as well as reducing losses in the production and transmission of thermal energy. One of the topical areas of research is the development of heat-insulating materials with high heat-insulating properties. This work is devoted to the study and comparison of the properties of heat-insulating materials, as well as the problems that arise during their installation and operation. Mineral wool and aerogel are considered as an example. The prospect of replacing high-temperature thermal insulation, which is widely used in industry, with a modern material developed on the basis of aerogel was studied. The temperature gradient across the thickness of the thermal insulation was calculated using a numerical tool developed in ANSYS. The results show that aerogel outperforms mineral wool in all key thermophysical characteristics. At the same time, the only obstacle to the widespread industrial production and use of aerogel in the high-temperature thermal insulation segment is its market value, which is still several times higher than that of mineral wool with equivalent thermal insulation characteristics.

Keywords: high-temperature thermal insulation, aerogel, thermal conductivity, numerical simulation, experiment.

Acknowledgements: This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state task No. 075-01262-22-01 of January 28, 2022 (Supplementary agreement 075-03-2022-151/1 of January 31, 2022).

Citation:

A.V. Fedyukhin, I.G. Akhmetova, S.A. Solovev, Efficiency analysis of modern heat-insulating materials for high-temperature pipelines, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 79–89, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28405>

Введение. Тепловая изоляция трубопроводов и оборудования определяет техническую возможность и экономическую эффективность технологических процессов и находит широкое применение в энергетике, химической, нефтеперерабатывающей, металлургической, пищевой и многих других отраслях промышленности. Тепловая изоляция позволяет управлять технологическими процессами с заданными параметрами, помогает обеспечить безопасные условия труда на производстве, позволяет поддерживать необходимую температуру в изотермических резервуарах и снижать потери легкоиспаряющихся нефтепродуктов. Ключевым показателем ее эффективности является коэффициент теплопроводности материала, от которого зависит толщина теплоизоляционного слоя, соответственно, и нагрузка на изолируемый объект, его конструктивные характеристики и габаритные размеры. Расчетные значения коэффициента теплопроводности принимаются с учетом его зависимости от температуры, степени уплотнения теплоизоляционных материалов в конструкции, швов конструкции, наличия крепежных деталей. При выборе теплоизоляционного материала необходимо учитывать температуростойкость теплоизоляционных материалов, возможную линейную усадку, потери прочности и массы, степень выгорания свя-

зующего при нагреве, прочностные и деформационные характеристики изолируемого объекта, допустимые нагрузки на опоры и изолируемые поверхности и другие влияющие факторы. В части транспортировки тепловой энергии актуальной является задача разработки теплоизоляционных материалов с высокими теплоизолирующими и прочностными характеристиками. В данном вопросе в научно-технической литературе уделяется большое внимание суперизоляционным материалам, обладающим крайне низкой теплопроводностью.

Постановка задачи

Целью данной работы является анализ перспектив применения современных теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля для изоляции высокотемпературного технологического оборудования с изучением технических и экономических аспектов.

Теплофизические характеристики аэрогеля

Основная доля потребления тепловой энергии промышленных предприятий приходится на водяной пар, расходуемый на технологические нужды производства. Для таких предприятий перспективными являются мероприятия, направленные на снижение тепловых потерь при транспортировке энергоносителей. Диапазон температур, в котором работают конструкции промышленной изоляции, составляет от -180 до 600°C . Для тепловой изоляции систем, транспортирующих высокотемпературные теплоносители, применяется промышленная тепловая изоляция, большая часть которой монтируется из волокнистых материалов (минераловатные и стекловатные изделия) [1].

Эффективность систем транспортирования тепло- и энергоносителей с точки зрения уменьшения тепловых потерь зависит от эффективности используемых теплоизоляционных материалов [2, 3]. Порядок определения нормативных значений тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов утвержден приказом Министерства Энергетики Российской Федерации от 30.12.2008 № 325¹. Величина фактических потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции не должна превышать нормативных значений.

Длительная эксплуатация в условиях высоких температур изменяет структуру теплоизоляционного материала, что приводит к увеличению эффективной теплопроводности теплоизоляционного слоя. Известно, что в случае с промышленной тепловой изоляцией величина фактических тепловых потерь по сравнению с нормативными может достигать от 20 до 60 % в зависимости от условий эксплуатации и особенностей температурных режимов.

С точки зрения уменьшения тепловых потерь и, как следствие, повышения эффективности систем транспортирования тепловой энергии, недостаточно выбрать теплоизоляционный материал с наименьшей теплопроводностью. При выборе оптимального теплоизоляционного материала, необходимо учитывать его способность длительное время сохранять заданные при проектировании нормативные значения величины тепловых потерь с учётом условий эксплуатации объекта.

Одним из самых перспективных материалов является наноструктурированный аэрогель на основе диоксида кремния ввиду своей наименьшей стоимости и простоты изготовления в сравнении с другими видами. Эффективность его использования обусловлена рядом уникальных свойств, которыми обладает этот материал. В первую очередь это низкий коэффициент теплопроводности, значение которого составляет около $0,015$ Вт/м·К при температуре 10°C . Объясняется это структурой аэрогеля: разветвлённая сеть из сферических кластеров диоксида кремния диаметром до 5 нм и пор между ними размерами до 100 нм, большую часть которой составляет воздух в статическом состоянии. Благодаря величине пор и колоссальной площади поверхности

¹ Российская Федерация. Приказ Министерства энергетики РФ от 30.12.2008. N325 (ред. от 10.08.2012) «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902148459>. (дата обращения: 21.09.2022)

структуры затруднены не только смачивание и последующая фильтрация влаги внутрь кластеров, но и даже сорбция влаги поверхностью аэрогеля, то есть материал является гидрофобным [4, 5].

Аэрогель в основном используется в соединении с другими материалами, что позволяет улучшить его базовые свойства, например, для снижения передачи инфракрасного излучения может применяться титанат калия шесть [6]. Методы соединения компонентов композиционного материала с использованием аэрогеля условно можно разделить на два варианта: введение до сушки в сверхкритических условиях либо на стадии формирования геля, либо в гель, заполненный соответствующим растворителем, и введение армирующих компонентов после сушки в сверхкритических условиях в готовый аэрогель, получаемый чаще всего с применением технологии сверхкритических сред [7, 8].

Кремниевый аэрогель, как и все аэрогели, обладает высокой пористостью, которая приводит к уникальным физическим, тепловым, оптическим и акустическим свойствам, основные из которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства кремниевого аэрогеля

Table 1

Physical properties of silicon aerogel

Свойство	Значение	Комментарий
Площадь поверхности	600–1000 м ² /г	
Плотность	0.003–0.35 г/см ³	в среднем ~ 0.1 г/см
Теплопроводность	13–16 мВт/м·К	
Содержание твердого в-ва	0.13–15 %	в среднем ~ 5 %
Средний диаметр пор	~ 20 нм	определено при помощи метода БЭТ
Показатель преломления	1,0 – 1,05	
Коэффициент температурного расширения	2,0 – 4,0·10 ⁶	определяется ультразвуковыми методами
Диэлектрическая постоянная	~ 1,1	при плотности = 0,1 г/см ³
Скорость звука	100 м/с	при плотности = 0,7 г/см ³

Для оценки долговременных характеристик материалов с использованием аэрогеля проводились лабораторные исследования по ускоренному старению материалов. Материалы испытывали следующие критические климатические нагрузки для получения результатов, аналогичным эксплуатации в стандартных условиях в течение 20 лет: солнечное излучение, то есть ультрафиолетовое, видимое и ближнее инфракрасное излучение; окружающее инфракрасное тепловое излучение; экстремальные температуры; температурные изменения/циклы; вода, влажность, относительная влажность воздуха, дождь (осадки); физические нагрузки, имитация снега и ветра; загрязнение, грязь и пыль; микроорганизмы, плесень и птичий помет. В результате экспериментов наибольшее увеличение теплопроводности показал теплоизоляционный гипс. При высоком уровне влажности теплопроводность 70 % об. у гипса, усиленного аэрогелем, увеличилась на 10% и достигла значения 0,035 Вт/м·К, теплопроводность сравнимая с теплопроводностью таких изоляционных материалов, как полиизоцианурат и пенополистирол. Интересно отметить, что более низкая пористость приводит к большей чувствительности аэрогеля к содержанию влаги [9]. Среди всех оцененных продуктов, усиленных аэрогелем, маты и древесноволокнистые плиты продемонстрировали превосходные характеристики как в несостаренных, так и в долговременных

условиях. Аморфный аэрогель SiO_2 , встроенный в стеклянную сетку после отжига до 250°C увеличил свою теплопроводность до $0,02 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ (с $0,017 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), а при отжиге при 70°C в течение 6 недель не показал изменений [10]. При воздействии продуктов горения при адиабатических температурах пламени более 2000 К происходит деградация материала по трем основным механизмам; потеря содержания стекловолокна, спекание структуры аэрогеля кремнезема и частичное плавление структуры аэрогеля кремнезема [11].

Автор статьи [12] провели исследования для определения целесообразности применения аэрогеля для тепловой изоляции зданий. В течение года тестировались небольшие лабораторные образцы со слоем аэрогеля толщиной 10 и 20 мм. Результаты исследований показали снижение энергопотребления на 23% для образца со слоем аэрогеля толщиной 10 мм, и 38% для образца со слоем аэрогеля толщиной 20 мм. Похожее исследование провели авторы работа [13], численно и экспериментально оценив эффективность применения аэрогелевой изоляции в зданиях. Авторы заменили традиционную стекловату в стенах здания и аргоновое стекло в стеклопакетах на аэрогель. Результаты исследований показали, что в целом годовое энергопотребление снизилось на 6%.

Технико-экономическое сравнение различных материалов

Основной задачей настоящего исследования являлось нахождение температуры на поверхности изоляции, а также визуализация температурного профиля. Для более объемного сравнения характеристик было принято решение провести расчеты в различных температурных условиях. Первая фаза эксперимента проводилась в условиях относительно низких температур, вторая фаза моделировала условия, близкие к экстремальным.

Согласно СП 41-103-2000 п.2.2.3 в случае использования тепловой изоляции, как средства, предохраняющего обслуживающий персонал от ожогов, температура поверхности не должна превышать 60°C для изолируемых объектов, расположенных на открытом воздухе, в рабочей или обслуживаемой зоне, либо 75°C для объектов, расположенных за пределами рабочей или обслуживаемой зоны. В соответствие с данной нормой, толщины тепловой изоляции для температурных режимов 300 и 600°C применялись равными: 20 и 60 мм для аэрогеля, 150 и 225 мм для минеральной ваты. Моделирование потока проводилось без пограничного слоя, так как в данном случае это практически не влияло на результат, но значительно ускорило вычисления.

В соответствии с СП 41-103-2000 приложение Б коэффициент теплопроводности для минеральной ваты рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda = 0,04500 + 0,00021 \cdot t. \quad (1)$$

Для задания коэффициента теплопроводности при моделировании опыта с аэрогелем, была использована информация, взятая с сайта производителя аэрогеля². Значение коэффициентов представлены в табл. 2.

На рис. 1 (а-г) представлены изображения температурных профилей на режимах 300 и 600°C , полученных в результате расчета.

Рис. 1 представлен для вида сверху и в сечении теплоизоляции. При этом температуры поверхности по-прежнему остаются на допустимом уровне, что позволяет судить о возможности замены широко используемой минеральной ваты на перспективный тип изоляции.

Экономический расчет проводился с учетом актуальной стоимости теплоизоляционных материалов на российском рынке на момент написания работы. Ключевым показателем в расчете является стоимость теплоизоляции за 1 м^3 (далее отмечается как P_1 , P_2 , P_3). Минеральная вата

² High temperature aerogel blankets with industry-leading protection against corrosion under insulation: [Электронный ресурс] // Aspen Aerogels. Режим доступа: <http://www.aerogel.com/product/pyrogel-xte/#specifications>. (дата обращения: 21.09.2022).

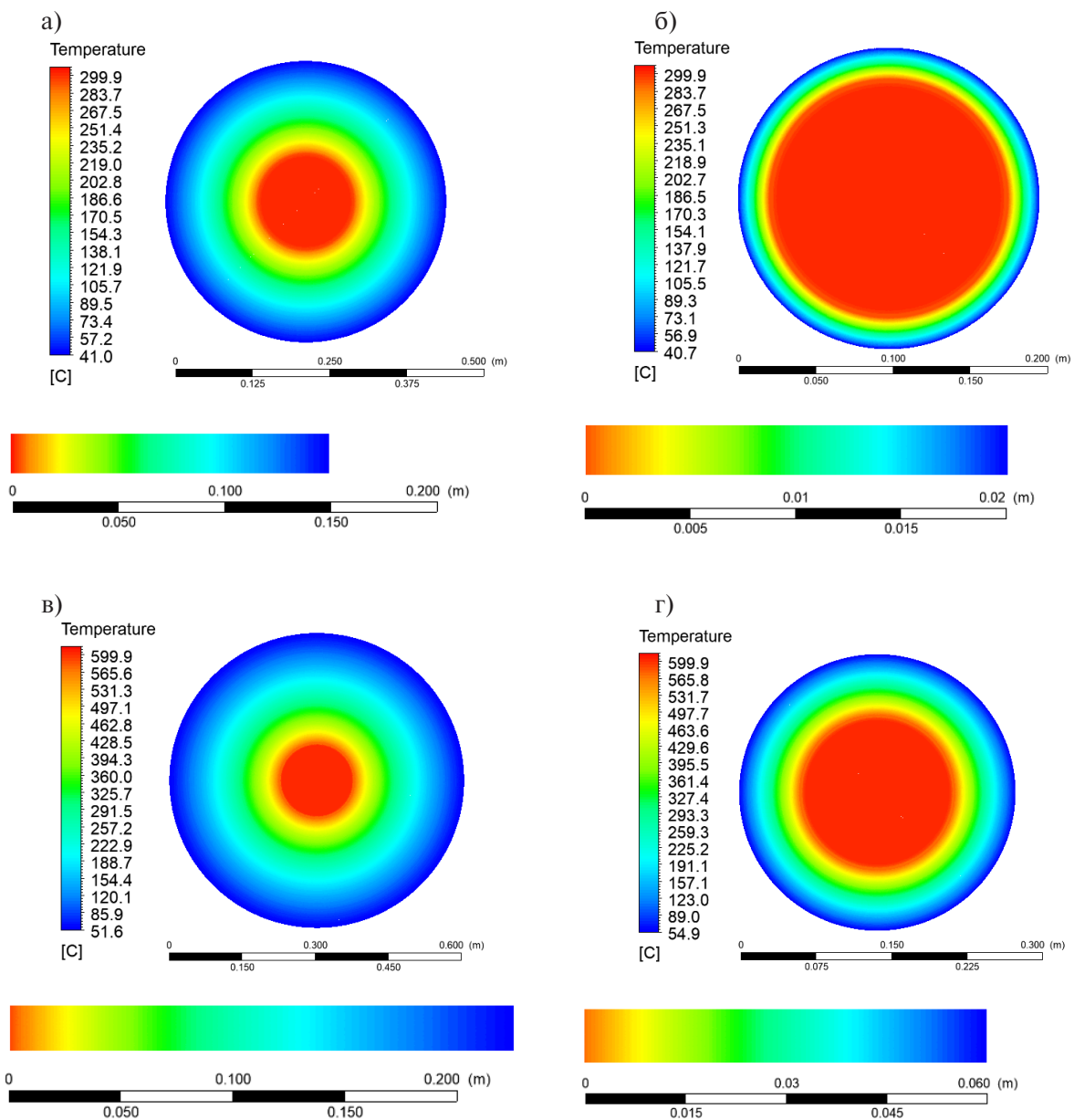


Рис. 1. Температурные профили: а) минеральной ваты при 300°С; б) аэрогеля при 300°С; в) минеральной ваты при 600°С; г) аэрогеля при 600°С
 Fig. 1. Temperature profiles: a) mineral wool at 300°С; б) aerogel at 300°С; в) mineral wool at 600°С; г) aerogel at 600°С

марки URSA GEO M-25 с температурой применения до 350°С имеет цену за 1 м² листа толщиной 50мм – 234 руб. 63 коп.³, тогда:

$$P_1 = 234,63 \cdot 1000 / 50 = 4692 \text{ руб. 60 коп.} \quad (2)$$

Так как исследование проводилось для двух температурных режимов (300 и 600°С), для более высоких значений температуры необходимо подобрать изоляцию, которая способна работать в

³ Утеплитель Урса GEO M-25: [Электронный ресурс] // Строй Партнер. Режим доступа: https://st-par.ru/catalog/mineralnaya_vata/ursa-geo-m-25/. (дата обращения: 21.09.2022)

Таблица 2

Точное значение коэффициента теплопроводности аэрогеля при различных значениях температуры

Table 2

The exact value of the thermal conductivity of the aerogel at various temperatures

Температура, °С	0	100	200	300	400	500	600	700
λ , мВт/м·К	16,3	18,3	22,6	29,5	39,4	52,6	69,4	90,1

таких условиях, например, минеральная вату марки Rockwool Wired Mat 80 с температурой применения до 640°С. Цена за 1 м² толщиной 100 мм – 1094 руб. 40 коп.⁴:

$$P_2 = 1094,40 \cdot 1000/100 = 10944 \text{ руб. } 00 \text{ коп.} \quad (3)$$

Аэрогель марки Aspen Aerogels Pyrogel XT с температурой применения до 650°С. Цена за 1 м² толщиной 10 мм – 3000 руб. 00 коп. [14]:

$$P_3 = 3000,00 \cdot 1000/10 = 300000 \text{ руб. } 00 \text{ коп.} \quad (4)$$

Срок службы трубы, которую необходимо изолировать – 30 лет. Диаметр – 150 мм, длина – 1 км. Исходя из полученных ранее данных, выбираем для трубы диаметром 150 мм следующие толщины слоев изоляции: 300°С и 600°С – 20 и 60 мм для аэрогеля, 150 и 225 мм для минеральной ваты. Предусмотрим износ минеральной ваты с плановой заменой каждые 10 лет, соответственно получаем две дополнительных замены.

Формула для нахождения объема теплоизоляции, необходимого для изолирования трубы с соответствующими геометрическими размерами:

$$V = (\pi \cdot (r + x)^2 - \pi \cdot r^2) \cdot l, \quad (5)$$

где r – радиус трубы, м; x – толщина слоя изоляции, м; l – длина трубы, м.

Объем минеральной ваты при температуре поверхности 300°С:

$$V_1 = (\pi \cdot (0,075 + 0,150)^2 - \pi \cdot 0,075^2) \cdot 1000 = 141,372 \text{ м}^3. \quad (6)$$

Аналогичным образом получаем остальные значения. Объем минеральной ваты при температуре поверхности 600°С: $V_2 = 265,072 \text{ м}^3$; объем аэрогеля при температуре поверхности 300°С: $V_3 = 10,681 \text{ м}^3$; при 600°С: $V_4 = 39,584 \text{ м}^3$.

В среднем рыночная цена монтажа 1 м² теплоизоляции равняется 1000 руб. Тогда стоимость монтажа изоляции для трубы с соответствующими геометрическими размерами определяется по следующей формуле:

$$M = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot 1000, \quad (7)$$

где обозначения соответствуют формуле (5).

$$M = 2 \cdot \pi \cdot 0,075 \cdot 1000 \cdot 1000 = 471238 \text{ руб. } 90 \text{ коп.} \quad (8)$$

⁴ Венторус [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://венторус.рф/catalog/tekhnicheskaya_izolyatsiya_rockwool/rockwool_wired_mat_80/. (дата обращения: 21.09.2022)

Так же необходимо учесть влияние инфляции на уровень цен в течение срока службы изоляции. По данным Центрального Банка Российской Федерации уровень инфляции за 2010 – 2020 года составил 91,10 % [15]. Предположим, что следующие 30 лет тенденция сохранится. В таком случае итоговая стоимость работ по изоляции объекта минеральной ватой, включая стоимость материала, определяется по следующей формуле:

$$P\Sigma = (P_i \cdot V_k + M) \cdot (1 + 1,911 + 1,911^2). \quad (9)$$

Для аэрогеля:

$$P\Sigma = P_3 \cdot V_k + M. \quad (10)$$

В табл. 3 представлены итоговые данные стоимости работ по изоляции трубопроводы длиной 1 км при сроке службы равном 30 лет. Предполагается, что износостойкость аэрогеля позволяет не проводить замену изоляции в течение 30 лет, в то время как минеральная вата требует замены каждый 10 лет. Для оценки влияния стоимости изолирования на рис. 2 представлено соотношение стоимости изоляции к стоимости работ по ее монтажу.

Таблица 3

Оценка стоимости изолирования трубопровода длиной 1 км

Table 3

Estimation of the cost of insulating a pipeline 1 km long

Материал и температура поверхности, °С	Стоимость монтажных работ, руб.	Стоимость материала, руб.	Итоговая стоимость, руб.
Минеральная вата, 300	3 092704	4 353856	7 446560
Аэрогель, 300	471239	3204300	3675539
Минеральная вата, 600	3 092704	19 038692	22 131396
Аэрогель, 600	471239	11875200	12346439

По результатам расчета можно заключить, что изоляция на основе аэрогеля практически в два раза выгоднее на долгосрочную перспективу, если принять во внимание тот факт, что его износостойкость соответствует паспортным характеристикам (не требует замены в течение 30 лет эксплуатации). Однако, данный тип изоляции требует качественного монтажа и обслуживания, в противном случае его замена обойдется значительно дороже, чем замена минеральной ваты.

Заключение

Одной из ключевых проблем высокотемпературной тепловой изоляции является ее устаревание, что существенно снижает важнейший показатель – коэффициент теплопроводности. Процесс старения в значительной степени ускоряется в результате несоблюдения норм, требований и правил как во время монтажа, так и в процессе эксплуатации тепловой изоляции, поскольку от сохранности ее первоначальных свойств напрямую зависит техническая и экономическая эффективность технологических процессов в энергетике и промышленности, а также безопасность персонала и сохранение надлежащих условий труда. Следовательно, вопросы производства эффективной тепловой изоляции, обладающей высокой износостойкостью и низкой теплопроводностью являются на сегодняшний день крайне актуальной задачей, которая требует всестороннего решения как с точки зрения выбора материала, так и толщины слоя и компоновки.

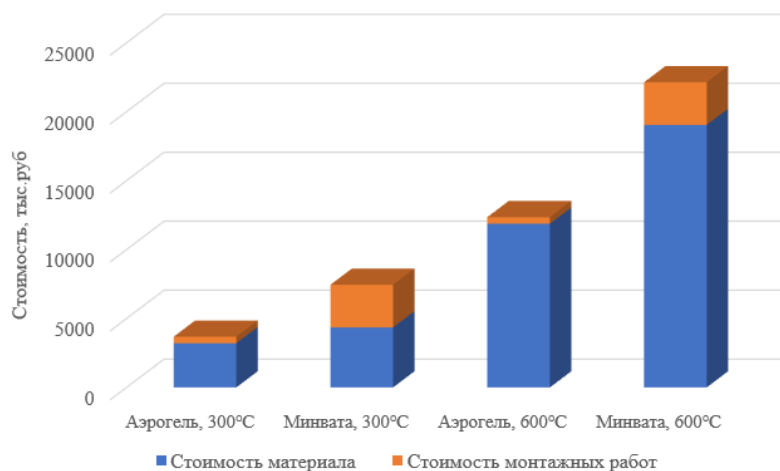


Рис. 2. Соотношение стоимости материала и стоимости монтажных работ при сроке службы трубопровода 30 лет
 Fig. 2. The ratio of the cost of material and the cost of installation work with a pipeline service life of 30 years

На основании данных, представленных в настоящей статье, можно заключить, что аэрогель по многим теплофизическим характеристикам превосходит своих конкурентов, в первую очередь, минеральную вату. Тем не менее, необходимо отметить, что сложность и дороговизна изготовления этого вида тепловой изоляции, а также отсутствие промышленного производства в Российской Федерации значительно усложняет возможность его широкого применения.

Развитие теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля является одним из ключевых направлений исследований, направленных на повышение энергоэффективности технологических процессов. В перспективе использование аэрогелей поможет избежать множества проблем, связанных со старением, разрушением и частой заменой тепловой изоляции, снизит нагрузку на теплоизоляционные конструкции и значительно повысит экономическую эффективность теплоэнергетических систем, сократив потери при производстве и передаче тепловой энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Guo J.F., Tang G.H., Feng J., Jiang Y.G., Feng J.Z. Non-silica fiber and enabled stratified fiber doping for high temperature aerogel insulation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 160. С. 120194.
- [2] Mozgova A. Testing heat supply networks for heat losses // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2021. T. 274. С. 08003.
- [3] Yang J., Wu H., Xu X., Huang G., Xu T., Guo S., Liang Y. Numerical and experimental study on the thermal performance of aerogel insulating panels for building energy efficiency // Renewable Energy. 2019. T. 138. Pp. 445–457.
- [4] Makeeva A.B., Videncov N.B., Dobrogorskaya L.B., Semenov K.B., Fedotov V.B. Инновационные материалы на основе аэрогеля в строительстве // Alfabuild. 2017. № 1. С. 89.
- [5] Li C., Chen Z., Dong W., Lin L., Zhu X., Liu Q., Zhang H. A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. T. 553. С. 120517.
- [6] Yu Y. The research and development of heat insulation materials with low thermal-conductivity in high temperature // 2015 International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering. Atlantis Press. 2015. Pp. 868–871.

- [7] **Lazrag M., Lemaitre C., Castel C., Hannachi A., Barth D.** Aerogel production by supercritical drying of organogels: Experimental study and modelling investigation of drying kinetics // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. Т. 140. Pp. 394–405.
- [8] **He F. et al.** Thermal conductivity of silica aerogel thermal insulation coatings // *International Journal of Thermophysics*. 2019. Т. 40. № 10. Pp. 1–12.
- [9] **Chen Y., Li D., Xie X. Q., Gao Y. He Y.** L Theoretical modeling and experimental validation for the effective thermal conductivity of moist silica aerogel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Т. 147. С. 118842.
- [10] **Lakatos Á., Csarnovics I.** Influence of thermal annealing on structural properties of silica aerogel super insulation material // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Т. 142. № 1. Pp. 321–329.
- [11] **Pyo Y., Robertson T., Yun S., Hong Z.** Experimental evaluation of using silica aerogels as the thermal insulator for combustor liners // *Journal of the Global Power and Propulsion Society*. 2020. Т. 4. Pp. 202–216.
- [12] **Elshazli M.T., Madaqiq M., Xing T., Ibrahim A., Johnson B., Yuan J.** Experimental study of using Aerogel insulation for residential buildings // *Advances in Building Energy Research*. 2021. Pp. 1–20.
- [13] **Golder S., Narayanan R., Hossain M.R., Islam M.R.** Experimental and CFD investigation on the application for aerogel insulation in buildings // *Energies*. 2021. Т. 14. № 11. С. 3310.
- [14] **Pyrogel XT – теплоизоляция для поверхностей со сверхвысокими температурами. Aerogel-Russia.** Режим доступа: <http://www.aerogel-russia.ru/cat/pyrogel-xt.html>. (дата обращения: 21.09.2022)
- [15] **Инфляция на потребительском рынке. Банк России: Центральный Банк Российской Федерации.** Режим доступа: https://cbr.ru/statistics/ddkp/macro_sub/. (дата обращения: 21.09.2022)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДЮХИН Александр Валерьевич – доцент Кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ», канд. техн. наук.
E-mail: fediukhinav@mpei.ru

АХМЕТОВА Ирина Гареевна – проректор по развитию и инновациям, Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук.
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

СОЛОВЬЕВ Сергей Анатольевич – доцент, Казанский государственный энергетический университет, канд. физ.-мат. наук.
E-mail: solovev.sa@kgeu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-3367>

REFERENCES

- [1] **J.F. Guo, G.H. Tang, J. Feng, Y.G. Jiang, J.Z. Feng,** Non-silica fiber and enabled stratified fiber doping for high temperature aerogel insulation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Т. 160. S. 120194.
- [2] **A. Mozgova,** Testing heat supply networks for heat losses // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2021. Т. 274. S. 08003.
- [3] **J. Yang, H. Wu, X. Xu, G. Huang, T. Xu, S. Guo, Y. Liang,** Numerical and experimental study on the thermal performance of aerogel insulating panels for building energy efficiency // *Renewable Energy*. 2019. Т. 138. S. 445–457.
- [4] **A.V. Makeyeva, N.V. Videnkov, L.V. Dobrogorskaya, K.V. Semenov, V.V. Fedotov,** Innovatsionnyye materialy na osnove aerogelya v stroitelstve // *Alfabuild*. 2017. № 1. S. 89.

- [5] C. Li, Z. Chen, W. Dong, L. Lin, X. Zhu, Q. Liu, H. Zhang, A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. T. 553. S. 120517
- [6] Y. Yu, The research and development of heat insulation materials with low thermal-conductivity in high temperature // 2015 International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering. Atlantis Press. 2015. S. 868–871.
- [7] M. Lazrag, C. Lemaitre, C. Castel, A. Hannachi, D. Barth, Aerogel production by supercritical drying of organogels: Experimental study and modelling investigation of drying kinetics // The Journal of Supercritical Fluids. 2018. T. 140. S. 394–405.
- [8] F. He, et al., Thermal conductivity of silica aerogel thermal insulation coatings // International Journal of Thermophysics. 2019. T. 40. № 10. S. 1–12.
- [9] Y. Chen, D. Li, X.Q. Xie, Y. Gao, Y.L. He, Theoretical modeling and experimental validation for the effective thermal conductivity of moist silica aerogel // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 147. S. 118842.
- [10] Á. Lakatos, I. Csarnovics, Influence of thermal annealing on structural properties of silica aerogel super insulation material // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. T. 142. № 1. S. 321–329.
- [11] Y. Pyo, T. Robertson, S. Yun, Z. Hong, Experimental evaluation of using silica aerogels as the thermal insulator for combustor liners // Journal of the Global Power and Propulsion Society. 2020. T. 4. S. 202–216.
- [12] M.T. Elshazli, M. Mudaqiq, T. Xing, A. Ibrahim, B. Johnson, J. Yuan, Experimental study of using Aerogel insulation for residential buildings // Advances in Building Energy Research. 2021. S. 1–20.
- [13] S. Golder, R. Narayanan, M.R. Hossain, M.R. Islam, Experimental and CFD investigation on the application for aerogel insulation in buildings // Energies. 2021. T. 14. № 11. S. 3310.
- [14] Pyrogel XT – teploizolyatsiya dlya poverkhnostey so sverkhvysokimi temperaturami. Aerogel-Russia. Rezhim dostupa: <http://www.aerogel-russia.ru/cat/pyrogel-xt.html>. (data obrashcheniya: 21.09.2022)
- [15] Influyatsiya na potrebitelskom rynke. Bank Rossii: Tsentralnyy Bank Rossiyskoy Federatsii. Rezhim dostupa: https://cbr.ru/statistics/ddkp/macro_sub/. (data obrashcheniya: 21.09.2022)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander V. FEDYUKHIN – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*.
E-mail: fediukhinav@mpei.ru

Irina G. AKHMETOVA – *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

Sergei A. SOLOVEV – *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: solovev.sa@kgeu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-3367>

Поступила: 01.11.2022; Одобрена: 08.12.2022; Принята: 09.12.2022.
Submitted: 01.11.2022; Approved: 08.12.2022; Accepted: 09.12.2022.