

УДК 691.175:536.2

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА И СТРАТЕГИЯ ЗАМЕНЫ ТРАДИЦИОННЫХ СИСТЕМ

Алешко В.Р., студент гр. ПИТЭ-25, I курс,
Научный руководитель: Ионина А.В., к.т.н., доцент
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

В условиях роста цен на энергоресурсы и ужесточения требований к декарбонизации повышение энергоэффективности и снижение теплопотерь являются приоритетными задачами. Традиционные материалы (минеральная вата, пенополистирол), что используются в промышленности на данный момент достигли предела своих возможностей: их эффективность требует увеличения толщины слоя, что ведет к росту габаритов конструкций и усложнению монтажа, также в условиях высоких температур и агрессивных сред обычная изоляция подвергается деформации и увлажнению, теряя свои свойства, из-за чего повышается необходимость перехода к новым материалам: наноструктурированным системам (аэрогели), вакуумным изоляционным панелям, PIR-плитам, пеностеклу и асбестосодержащим композитам. Подробное изучение свойств этих материалов и обоснование целесообразности их применения взамен устаревших теплоизоляторов является важным направлением модернизации теплоэнергетики.

В связи с этим особое внимание заслуживают материалы нового поколения, среди которых аэрогель занимает одно из ведущих мест. Аэрогель представляет собой гель, в котором жидкая фаза заменена газообразной без изменения исходного объема. Это достигается путем выпаривания жидкости при высоких температуре и давлении. В результате формируется древовидная нанопористая структура, проницаемая для газов и пара. Чистый аэрогель – это твердый ультралегкий материал, где нанопоры занимают до 99 % объема [1].

Наиболее распространены аэрогели на основе диоксида кремния, отличающиеся чрезвычайно низкой плотностью (около $1,9 \text{ кг/м}^3$) и пористостью до 99,8 %. Первые образцы были получены С. Кистлером в 1931 г., однако широкое промышленное применение стало возможным лишь с совершенствованием технологий сверхкритической сушки в последние десятилетия.

Ключевая особенность аэрогеля - это его особая наноструктура. Аэрогель состоит из кластеров диоксида кремния на наноуровне, образующих трехмерную сеть с размером пор меньше чем 100 нм, что приводит к эффекту Кнудсена, в результате чего диаметр пор становится меньше среднего свободного пробега молекул газа [1; 7], практически прекращая теплоперенос через газовую фазу.

Теплопроводность аэрогеля равна $0,017 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, поэтому аэрогель считается одним из самых эффективных твердых теплоизоляторов. Аэрогель как материал теплоизоляции обладает высокой огнестойкостью и выдерживает температуры до 1200°C , что важно для промышленности, где достаточно много оборудования и пространства передающего через свои стенки высокую температуру [1; 7].

Если сравнивать аэрогель с материалами, которые используются в промышленности сейчас, то как теплоизолятор он значительно превосходит другие материалы, такие как минеральная вата или пенополистирол, у которых показатели соответственно $0,035\text{--}0,045 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ и $0,030\text{--}0,040 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [2; 3], из чего следует, что аэрогель эффективнее в 2–2,5 раза. Данные показатели означают, что в местах с большим количеством минеральной ваты, можно было бы ее заменить на аэрогель, и получить существенное преимущество в ограниченных пространствах или при изоляции сложного оборудования, уменьшая также массогабаритные характеристики.

Пока что из-за высокой стоимости аэрогель не может широко распространиться как теплоизоляционный материал, но более дешевые методы сушки и масштабирование производства аэрогеля возможно решат данную проблему. Применение аэрогеля как добавку для различных композитов на данный момент позволяет создавать более энергоэффективные покрытия [1; 7].

Помимо аэрогелей стоит обратить внимание на вакуумные изоляционные панели, так как они не менее перспективны в направлении высокоэффективной теплоизоляции, так как позволяют достаточно сильно снизить коэффициент теплопроводности в сравнении с классическими теплоизоляторами [4; 5]. Принцип работы вакуумных изоляционных панелей основан на том, что внутри материала благодаря вакууму отсутствует воздух и без газовой среды тепло не может перемещаться с помощью конвекции или движения молекул.

Сама идея вакуумной изоляции в плоских панелях начала формироваться в середине 20-го века, но массовое внедрение VIP не происходило по причине отсутствия надежных газонепроницаемых материалов и высокой стоимости подходящих наполнителей. Активным этапом развития вакуумной изоляции можно считать 1990-е года, когда происходил рост требований к теплоизоляции и ее энергоэффективности. Сама же конструкция VIP состоит из высокопористого жесткого сердечника и герметичной многослойной оболочки, обладающей высокими барьерными свойствами, которые препятствуют проникновению различных газов и паров. Эффективность самой панели напрямую зависит от того, насколько хорошо выбранный наполнитель блокирует передачу тепла через свою твердую основу и при этом не разрушается, когда на него воздействует атмосферное давление. [4; 6]

Чаще всего в качестве наполнителя для VIP используют порошок аморфного микрокремнезема или же модифицированный и обработанный термически диатомит. Для того чтобы наполнитель эффективно блокировал передачу тепла, его

изначально спрессовывают, а затем упаковывают в вакуумную оболочку [5]. Благодаря данной технологии получается микропористая структура, которая обладает низкой теплопроводностью и долговечна.

Главным преимуществом вакуумных изоляционных панелей (VIP) является их очень низкая теплопроводность. Теплопроводность данной изоляции с наполнителем из диатомита составляет $0,005 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, в сравнении с минеральной ватой, у которой данный показатель составляет всего $0,040 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Таким образом, вакуумные изоляционные панели лучше по энергоэффективности в 8 раз, чем классические теплоизоляторы. На практике это означает, что VIP-панель толщиной 20 мм эквивалентна 160 мм минеральной ваты. Данная экономия пространства является особенно важной для промышленных объектов теплоэнергетики, где промышленное оборудование размещается достаточно плотно друг к другу.[4]

Еще одним важным теплоизоляционным материалом является полиизоцианурат (PIR). Это термореактивный полимер, у которого закрытая ячеистая структура. Данный полимер обладает повышенной жесткостью и термостойкостью. Полиизоцианурат имеет сходства с полиуретаном, но превосходит его по ряду характеристик. Синтез полиизоцианурата основан на повышенном содержании метилендифенилдиизоцианата и замене полиолов на полиэферы. Под действием специальных каталитических систем и функциональных добавок происходит реакция циклотримеризации, которая приводит к формированию изоциануратных колец. Эти кольца, обладая высокой энергией связи, обеспечивают термическую стабильность материала и формирование защитного коксового слоя при воздействии огня [3].

Структура PIR-плит состоит на 95–97 % из замкнутых микроячеек, заполненных газом с низкой теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности составляет около $0,022 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что в 1,6–1,8 раза ниже, чем у минеральной ваты и пенополистирола [3]. Материал отличается высокой прочностью на сжатие, стабильностью размеров в диапазоне температур от -70 до $+120$ °C, а металлизированные покрытия обеспечивают сохранение характеристик на протяжении 50 лет [3].

Альтернативой полимерным утеплителям выступают неорганические материалы, одним из наиболее надежных представителей которых является пеностекло. Пеностекло – это пористый теплоизоляционный материал неорганического происхождения с замкнутой ячеистой структурой, получаемый термической обработкой стеклопорошка и газообразователя [2]. Его разработка связана с созданием жесткого изоляционного барьера, устойчивого к агрессивным средам и экстремальным температурам. Базовым методом производства пеностекла считается метод основанный на порошковом вспенивании, а именно стеклянный бой измельчается, затем смешивается с газообразователями, такими как антрацит, кокс или карбонаты, после чего нагревается до $750-850$ °C. Во время процесса газовой выделения данной смеси образуется прочный силикатный каркас имеющий герметичные микропоры [2].

Характерной особенностью пеностекла считается его низкая плотность в сочетании с высокой прочностью на сжатие (0,5-5 МПа). Также в отличие от волокнистой теплоизоляции, которая склонна к накоплению влаги, пеностекло практически обладает нулевой водопоглощенностью, так как его структура состоит из стеклянных перегородок которые как барьер препятствуют попаданию влаги во внутрь материала. Пеностекло обладает теплопроводностью более высокой, чем у аэрогеля или вакуумных панелей, его коэффициент составляет 0,045-0,08 Вт/(м·К), но в отличие от данных теплоизоляторов пеностекло обладает абсолютной пожарной безопасностью класса НГ и защищенностью от биологической коррозии, благодаря чему пеностекло будет незаменимо на объектах с высокими требованиями к надежности, к таким объектам можно отнести: АЭС, различные подземные хранилища и нефтехимические резервуары.

К числу инновационных теплоизоляторов на неорганической основе относится пеноасбест, материал который рассчитан на эксплуатацию в условиях повышенной температуры. Пеноасбест - это пористый композитный материал, в котором армирующим компонентом служит хризотилковое волокно, то есть природный гидросиликат магния и в отличие от органических полимеров, которые разрушаются при 150-200 °С, пеноасбестовые системы сохраняют стабильность до 600 °С [2]. Это их свойство обусловлено кристаллической структурой хризотиласбеста. Применение таких материалов оправдано в зонах прямого термического воздействия, там где другие изоляторы применить невозможно.

Пеноасбест получается путем смешивания и взаимодействия хризотилковых волокон с неорганическими связующими и газообразователями, что создает армированную, прочную матрицу с множеством мелких пустот [2]. По сравнению с минеральным волокном пеноасбест отличается повышенной вибростойкостью и нейтральностью к химическому воздействию со стороны. Минеральная вата при высоких температурах и вибрациях спекается и теряет упругость, увеличивая теплопроводность. Пеноасбест же сохраняет стабильный коэффициент теплопроводности в диапазоне 0,050-0,090 Вт/(м·К) [2]. Высокая прочность волокон хризотила обеспечивает долговечность изоляции при интенсивных механических воздействиях. Пеноасбест может применяться в качестве высокотемпературного подслоя в комбинированных системах, снижая тепловой поток до уровня, приемлемого для более эффективных, но менее термостойких материалов (PIR, аэрогели) [2; 3].

Представленные инновационные теплоизоляционные материалы существенно различаются по своей структуре, теплофизическим свойствам, условиям применения и чтобы наиболее наглядно сравнить ключевые характеристики данных материалов ниже приведена сравнительная таблица (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика теплоизоляционных материалов

Параметр	Аэрогель	Вакуумные панели	PIR-плиты	Пеностекло	Пеноасбест
Коэф. теплопроводности (λ), Вт/(м·К)	0,017	0,002-0,005	0,022	0,045-0,08	0,050-0,090
Плотность, кг/м ³	1,9-150*	150-350	30-100	120-200	150-300
Максимальная рабочая температура, °С	До 1200	До 80-120	от -70 до +120	До 450-500	До 600
Группа горючести	НГ	НГ	Г1-Г2	НГ	НГ
Водопоглощение	Низкое (гидрофобен)	Практически отсутствует	Менее 1 %	Практически отсутствует	Низкое
Преимущества	Рекордно низкая λ ; высокая термостойкость (до 1200 °С)	Минимальная λ ; стабильность свойств	Высокая теплоэффективность; долговечность	Абсолютная негорючесть; химическая стойкость	Термостойкость до 600 °С; вибростойкость
Основные ограничения	Высокая стоимость; хрупкость	Высокая стоимость; уязвимость оболочки	Ограниченная термостойкость (до +120 °С)	Более высокая λ (по сравнению с аэрогелем и VIP)	Более высокая λ ; требования безопасности при производстве
*Для промышленных композитов на основе аэрогеля плотность может достигать 150-250 кг/м ³ .					

Систематизированные в таблице характеристики подтверждают высокий потенциал инновационных теплоизоляционных материалов. Для того чтобы определить, насколько оправдано широкое применение новых теплоизоляционных материалов, необходимо провести сопоставительный анализ с традиционными аналогами, а именно минеральной ватой и пенополистиролом. Традиционные теплоизоляторы уже достигли своего технологического предела. Основной проблемой традиционных теплоизоляторов является высокая материалоемкость, из-за которой требуются слои теплоизоляции толщиной более 200-250 мм, что влечет за собой удорожание монтажа, увеличение нагрузки на несущие конструкции и

увеличение габаритных размеров самой конструкции. Избежать этих ограничений можно благодаря инновационным теплоизоляционным материалам.

Ключевым отличием инновационных материалов является коэффициент теплопроводности (λ). У новых теплоизоляторов он в несколько раз ниже, чем у традиционных. Вакуумные изоляционные панели (VIP) обладают теплопроводностью составляющей 0,002-0,005 Вт/(м·К), что в 8-10 раз эффективнее минеральной ваты при ее теплопроводности в 0,040 Вт/(м·К). Аэрогели же обеспечивают теплопроводность в 0,017 Вт/(м·К). Благодаря таким характеристикам инновационных теплоизоляционных материалов возможно использовать тонкую изоляцию, слой которой будет в 5-8 раз тоньше при том же уровне теплозащиты [1; 5]. Это особенно важно для стеновых панелей, транспортных систем и трубопроводов малого диаметра.

Однако преимущества инновационных систем не ограничиваются низким коэффициентом теплопроводности. Важен аспект эксплуатационной стабильности. Классические утеплители гигроскопичны; накопление влаги снижает их теплоизоляционные свойства до 50 % и более, провоцируя коррозию. В отличие от них, пеностекло и PIR-плиты с закрытой ячеистой структурой практически непроницаемы для воды и пара [2; 3]. Пеностекло, сохраняя прочность до 5 МПа, функционирует более 100 лет, что значительно превышает срок службы традиционных утеплителей [2].

С точки зрения промышленной безопасности критическими факторами являются огнестойкость и термическая стабильность. Пенопласты (PUR-пенополиуретан, EPS-пенополистирол) горючи и выделяют токсичные газы [3]. PIR-плиты при нагреве образуют коксовый слой, препятствующий распространению пламени. Неорганические системы - пеностекло и пеноасбест - относятся к классу негорючих материалов (НГ) [2]. Способность пеноасбеста выдерживать нагрев до 600 °С и аэрогелей до 1200 °С позволяет использовать их для защиты оборудования в условиях сверхвысоких температур [1; 2].

Массовое внедрение инновационных теплоизоляционных систем (аэрогелей, VIP, PIR-структур и пеностекла) влечет за собой не только технологическую, но и экономическую трансформацию. Изначальным сдерживающим фактором для данных теплоизоляционных материалов была их высокая первоначальная стоимость, но если оценить полный срок эксплуатации, то все суммарные эксплуатационные затраты при их использовании вместо традиционных оказываются ниже на 30–40% [2; 3; 5]. Данные показатели достигаются за счет того что снижаются затраты на компенсацию теплопотерь, минимизируются риски, которые связаны с коррозией под изоляцией, а также за счет исключения ремонтов (замена намокшей ваты).

Снизить себестоимость данных теплоизоляционных материалов можно за счет локализации производства, используя сырье из региональных месторождений или техногенных отходов. Благодаря этому модифицированный диатомит

способен заменить дорогие импортные наполнители в вакуумных панелях (VIP) без потери необходимого уровня вакуума и уровня термического сопротивления [5]. А производство пеностекла из стеклобоя будет наиболее экономически выгодным так как позволит утилизировать отходы и выпускать изоляции с низкой энергоемкостью [2]. Также применение местного сырья сокращает логистические издержки, делая инновационные теплоизоляционные материалы более доступными.

Замена традиционных теплоизоляторов на современные теплоизоляционные материалы является необходимым этапом в модернизации теплоизоляции и теплоэнергетики в целом. Такой переход позволит делать изоляционные слои тоньше и гарантировать стабильность теплотехнических характеристик на значительно больший срок эксплуатации, а также обеспечивать высокий уровень огнестойкости. Техничко-экономическая целесообразность данного решения также подтверждается снижением эксплуатационных расходов и возможностью использовать вторичное сырье, что делает данные теплоизоляционные материалы основой для будущей промышленности.

Список литературы:

1. Андрюшенков, А. А. Аэрогель: его свойства и применение / А. А. Андрюшенков; научный руководитель А. А. Яковлев. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – 12 с. – (Материалы LXXI студенческой научной конференции). – Текст: непосредственный.
2. Колосова, А. С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на неорганической основе / А. С. Колосова, Е. С. Пикалов // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 9. – С. 64–74. – ISSN 1681-7494. – Текст: непосредственный.
3. Ильин, Д. А. Плиты PIR для производства энергоэффективных стеновых панелей / Д. А. Ильин, Е. С. Калмыкова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 5. – С. 1–13. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9252 (дата обращения: 28.03.2026). – Текст: электронный.
4. Куприяшкина, Л. И. Применение теплоизоляционных вакуумных панелей в ограждающих конструкциях / Л. И. Куприяшкина, М. А. Муханов, Д. А. Родькина, Р. А. Ахметжанов // Огарев-Online. – 2022. – № 5. – URL: journal.mrsu.ru/arts/novye-stenovyeteplioizolyacionnye-konstrukcii (дата обращения: 28.03.2026). – Текст : электронный.
5. Селяев, В. П. Вакуумные теплоизоляционные панели на основе модифицированного диатомита / В. П. Селяев, В. А. Неверов, О. Г. Маштаев, Н. Н. Киселев // Строительные материалы. – 2014. – № 4. – С. 59–62. – ISSN 0585-430X. – Текст: непосредственный.
6. Жжоных, А. М. Низковакуумные теплоизоляционные панели на основе отхода производства кристаллического кремния / А. М. Жжоных // Вестник

Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 106–114. – ISSN 1814-3520. – Текст: непосредственный.

7. Бабашов, В. Г. Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов (обзор) / В. Г. Бабашов, Н. М. Варрик, Т. А. Карасева // Труды ВИАМ. – 2019. – № 6 (82). – С. 32–42. – ISSN 2307-6046. – Текст: электронный. – DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-32-42.