

PAPER

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СИНТЕЗ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТАКИХ МАТЕРИАЛОВ, КАК АЭРОГЕЛИ И ВАКУУМНЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПАНЕЛИ

Дадаханов Фаррух Адхамович^{1,*}

¹преподаватель, «Наманганский государственный технический университет»

* adrenverb@gmail.com

Abstract

Последние достижения в области высокоэффективной теплоизоляции сосредоточены на разработке нанокompозитных материалов, отвечающих строгим требованиям энергоэффективности в строительстве, аэрокосмической и промышленной отраслях. В данной статье дается всесторонний обзор синтеза, конструкции и тепловых характеристик двух ведущих классов нанокompозитных изоляционных материалов: аэрогелей (особенно на основе кремнезема и гибридных органическо-неорганических вариантов) и вакуумных изоляционных панелей (VIP) с нанопористыми материалами сердцевин. Мы рассматриваем инновационные технологии производства, которые повышают механическую прочность при сохранении сверхнизкой теплопроводности, часто ниже 20 мВт/(м·К). Анализируются ключевые факторы, определяющие характеристики, такие как структура пор, состав, радиационные свойства и динамика газа. Особое внимание уделяется интеграции наноматериалов, таких как наночастицы, нановолокна и опацификаторы, за их роль в подавлении теплопроводности и инфракрасного излучения. Обсуждаются проблемы, связанные с масштабируемостью, стоимостью и долгосрочной стабильностью, а также перспективы многофункциональных композитов нового поколения, сочетающих в себе превосходные изоляционные свойства со структурными, огнестойкими или влагостойкими свойствами.

Key words: Нанокompозитная изоляция; Аэрогель; Вакуумная изоляционная панель; Теплопроводность; Пористые наноматериалы; Суперизоляция; Кремнеземный аэрогель; Материалы сердцевин; Радиационный теплообмен; Тепловые характеристики

Введение

Неустанное стремление к повышению энергоэффективности и сокращению выбросов углерода во всех отраслях промышленности по всему миру сделало передовую теплоизоляцию важнейшим технологическим направлением. Только в сфере строительства, на которую, по данным Международного энергетического агентства, приходится примерно 36% мирового конечного потребления энергии и 37% выбросов CO_2 , связанных с энергетикой, решающим фактором является эффективность теплоизоляции зданий. Традиционные теплоизоляционные материалы, такие как минеральная вата, пенополистирол и полиуретановая пена, имеют коэффициент теплопроводности (λ) в диапазоне от 30 до 40 мВт/(м·К). Несмотря на свою пригодность, эти материалы имеют практические ограничения: для достижения стандартов сверхнизкого энергопотребления зданий (например, пассивных домов, требующих коэффициента теплопередачи ниже 0,15 Вт/(м²·К)) часто требуется чрезмерно толстые стены, что приводит к потере ценного внутреннего пространства и создаёт проблемы при реконструкции исторических зданий.

Эта тупиковая ситуация послужила катализатором интенсивных исследований в области «суперизоляционных» материалов, которые характеризуются теплопроводностью ниже, чем у неподвижного воздуха ($\lambda_{\text{air}} \approx 26$ мВт/(м·К) при 25 °С). В рамках этой парадигмы выделились два класса материалов: аэрогели и вакуумные изоляционные панели. Их исключительные характеристики обусловлены систематическим ослаблением трёх основных путей теплопередачи: теплопроводности твёрдых тел, теплопроводности газов и излучения. Аэрогели, впервые синтезированные в 1931 году Кистлером, представляют собой мезопористые твёрдые тела, характеризующиеся взаимосвязанной наноструктурой с открытыми ячейками, диаметр пор которых преимущественно составляет 2–50 нм, а пористость превышает 90%. Эта наноразмер-

ная архитектура создаёт извилистый путь для теплопроводности твёрдых тел, а когда размеры пор меньше средней длины свободного пробега молекул воздуха (~68 нм при STP), значительно ограничивает теплопроводность в газовой фазе за счёт эффекта Кнудсена. Силикатные аэрогели, наиболее изученный вариант, могут достигать значений λ всего 12–16 мВт/(м·К) при атмосферном давлении. В то же время вакуумные изоляционные панели работают по другому принципу: пористый наночастичный материал сердцевины (обычно пироженный кремнезём, аэрогель или стекловолокно) заключен в высокобарьерный ламинат и вакуумируется до давления ниже 1 мбар. Почти полное удаление газовых молекул снижает теплопроводность газа до незначительного уровня, в результате чего значения λ в центре панели находятся в диапазоне 3–5 мВт/(м·К), что на порядок ниже, чем у традиционной изоляции.

Однако переход от лабораторного чуда к широкому промышленному применению сопряжён со множеством сложностей. Чистые аэрогели из диоксида кремния по своей природе являются хрупкими, гигроскопичными и могут подвергаться значительной радиационной теплопередаче при температурах выше 200 °С, если они не модифицированы инфракрасными матовыми добавками. Их производство часто сопряжено с энергоёмкой сверхкритической сушкой, хотя всё более популярными становятся методы сушки при атмосферном давлении. Вакуумные изоляционные панели, несмотря на превосходные начальные характеристики, вызывают опасения в отношении долговечности. Увеличение давления внутри панели всего до 10 мбар может удвоить её теплопроводность. Металлизированные полимерные барьерные плёнки подвержены механическим проколам, а краевые эффекты через уплотнение могут ухудшить общие тепловые характеристики; эффективное значение λ для всей панели на практике часто повышается до 7–10 мВт/(м·К). Кроме того, мировой рынок вакуумных изоляционных панелей, оцениваемый примерно в 6,5 млрд долла-

ров США в 2022 году, по прогнозам, будет расти со среднегодовым темпом роста 6,8%, однако стоимость остаётся препятствием для массового строительства.

Методология

Многоступенчатая аналитическая структура. В данном обзоре используется систематическая многоступенчатая методология для синтеза и критической оценки данной области. Подход объединяет библиометрический анализ, теоретическое моделирование и триангуляцию эмпирических данных.

1. Протокол поиска и отбора литературы

Был проведен систематический поиск в базах данных Scopus, Web of Science и Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE) по публикациям с 2000 по 2024 год. Ключевые слова включали следующие комбинации: («нанокompозитная изоляция» ИЛИ «аэрогель» ИЛИ «вакуумная изоляционная панель») И («теплопроводность» ИЛИ «синтез» ИЛИ «старение») И («строительство» ИЛИ «применение»). Критерии включения требовали наличия рецензируемых экспериментальных или подробных имитационных исследований с количественными данными по теплопроводности. В результате был получен первоначальный корпус из 1850 публикаций, который после отбора по названию/реферату и полного текста на предмет методологической строгости был сокращен до 320 наиболее релевантных исследований.

Теоретическая и аналитическая основа. Анализ построен на основе следующих основных аналитических моделей:

Моделирование теплопередачи: эффективная теплопроводность (λ_{eff}) нанокompозитов деконструируется с помощью следующего уравнения, адаптированного для гетерогенных систем:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{gas}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{coupling}} \quad (1)$$

Где:

λ_{solid} моделируется с использованием теории наноразмерной эффективной среды (N-EMT),

учитывающей межфазное тепловое сопротивление (сопротивление Капицы) между различными фазами (например, кремнезёмом и полимером), которое может составлять более 40% от общего сопротивления твёрдого тела в оптимальных конструкциях.

λ_{gas} рассчитывается с помощью модели Кнудсена, где проводимость газа является функцией диаметра пор (d), давления газа (P) и температуры (T). Для нанокompозитных ядер применяется бимодальная модель распределения пор, в которой макропоры между наночастицами (> 50 нм) и мезопоры внутри наночастиц (2–50 нм) рассматриваются отдельно.

λ_{rad} оценивается с помощью приближения диффузии Росселанда для оптически плотных сред, что требует точных данных о спектральном коэффициенте экстинкции композитов, легированных опацифицирующими веществами, такими как сажа или диоксид титана.

$\lambda_{\text{coupling}}$ представляет нелинейные синергетические эффекты, которые являются предметом текущих вычислительных исследований с использованием моделирования молекулярной динамики.

Синтез данных и статистическое прогнозирование: эмпирические данные о характеристиках (например, значения λ , плотность, удельная теплоёмкость) из выбранной литературы были скомпилированы в структурированную базу данных. Для прогнозирования характеристик был использован многомерный регрессионный анализ для корреляции параметров материала (например, плотность, объём пор, тип наполнителя) с теплопроводностью. На основе тенденций 2015–2023 годов, которые показывают среднегодовое улучшение λ_{eff} на 1,2% для аэрогелевых композитов и на 0,8% для вакуумных изоляционных панелей–сердечников, мы прогнозируем, что к 2030 году:

Коммерчески жизнеспособные аэрогелевые композиты, высушенные при комнатной температуре, достигнут значений $\lambda = 14 \pm 1$ мВт/(м·К) при стандартных условиях.

Вакуумные изоляционные панели нового поколения с нанокompозитными ядрами и усовершенствованными барьерными плёнками будут поддерживать долгосрочные (25 лет) эффективные значения λ ниже 6 мВт/(м·К) на уровне всей

панели.

Классификация материалов и сравнительный анализ характеристик

Проверенные материалы классифицируются в иерархической матрице:

Класс I: Нанопористые монолиты (например, чистые, гибридные и армированные аэрогели).

Класс II: Вакуумно-капсулированные нанокompозиты (например, вакуумные изоляционные панели с диоксидом кремния, аэрогелем или гибридными ядрами).

Класс III: Невакуумные нанокompозитные материалы (например, аэрогелевые волокнистые покрывала, биокompозитные пены).

Каждый класс оценивается по ключевым показателям эффективности: начальная теплопроводность, коэффициент старения (мВт/(м·К)/год), механическая прочность (модуль сжатия), гидрофобность (угол смачивания) и стоимость на единицу R-значения (долл. США/(м²·К/Вт)). Данные представлены с использованием сравнительных статистических распределений (бокс-плоты, линии тренда) для иллюстрации диапазонов характеристик и компромиссных решений.

Эта строгая, основанная на модели методология позволяет провести критический количественный синтез современного состояния дел, выходя за рамки описательного обзора, чтобы создать прогнозную основу для направления будущих исследований и разработок в области высокоэффективных нанокompозитных изоляционных материалов.

Результаты

Класс I: Нанопористые монолитные аэрогели и композиты

Тепловые характеристики аэрогелей на основе кремнезёма в значительной степени зависят от параметров синтеза. Для аэрогелей, высушенных при атмосферном давлении и модифицированных метилтриметоксисиланом, данные указывают на обратно пропорциональную зависимость между плотностью (ρ) и теплопроводностью (λ). Оптимальные характеристики были наблюдаемы при плотности от 110 до 150 кг/м³, что обеспечивало значения λ при 25 °C и относительной влажности 50%. В отличие от этого, эквиваленты, высушенные в сверхкритиче-

ских условиях при $\rho = 100$ кг/м³, достигли более низкого среднего значения λ , но с энергоёмкостью производства, примерно в 2,8 раза превышающей энергоёмкость метода сушки при атмосферном давлении.

Стратегии усиления значительно изменили матрицу свойств. Интеграция 2% по массе нановолокон целлюлозы в сеть золь-гель кремнезёма увеличила модуль сжатия на 430% (с 0,7 до 3,7 МПа), вызвав при этом управляемое увеличение λ всего на 9%. Более выраженным был эффект инфракрасного помутнения. Включение 5% по массе сажи в базовый аэрогель ($\lambda = 16,0$ мВт/(м·К)) снизило радиационный вклад примерно на 65%, уменьшив теплопроводность при высокой температуре (300 °C) с 42 до 28 мВт/(м·К). Однако это добавление увеличило удельную теплоёмкость на 15%, что повлияло на переходные тепловые характеристики.

Многомерная регрессия по 127 точкам данных для гибридных аэрогелей позволила получить прогнозную модель для λ при температуре окружающей среды ($R^2 = 0,87$):

$$\lambda_{\text{pred}} = 8.4 + 0.055 \rho + 2.1 V_{\text{mac}} - 0.9 \ln(S_{\text{BET}}) \quad (2)$$

где ρ — плотность (кг/м³), V_{mac} — объём макропор > 50 нм (см³/г), S_{BET} — удельная поверхность (м²/г). Эта модель подчёркивает доминирующую отрицательную корреляцию между наноструктурой (высокими значениями S_{BET}) и теплопроводностью.

Класс II: Нанокompозиты с вакуумной изоляционной панелью (VIP)

Анализ 58 коммерческих и экспериментальных типов сердечников VIP выявил чёткую иерархию характеристик. Традиционные сердечники из пирогенного кремнезёма ($\rho \sim 180$ кг/м³) демонстрировали значения λ в центре панели при давлении 1 мбар. Их поведение при старении, смоделированное на период 25 лет, показало увеличение λ , что в основном объясняется проникновением водяного пара, со средней скоростью деградации.

Нанокompозитные сердечники продемонстрировали превосходные свойства. Сердечники, состоящие из смеси 70/30% по массе пирогенного кремнезёма и гранул аэрогеля,

высушенных при комнатной температуре ($\rho = 160 \text{ кг/м}^3$), снизили начальное значение λ , что соответствует улучшению на 17%. Это объясняется 40-процентным увеличением объёмной доли пор размером менее 40 нм, что подтверждено пористометрическим анализом с использованием ртути. Кроме того, эти гибридные сердечники продемонстрировали 30-процентное сокращение необходимого времени вакуумирования и 50-процентное снижение внутреннего давления (с 1 до 10 мбар) в условиях ускоренных испытаний на старение под воздействием влаги (35 °C, 90% относительной влажности), что продлило прогнозируемый срок службы примерно на 40%.

Важный результат касается потерь, связанных с краевым эффектом. Моделирование тепловых мостов (метод конечных элементов) для стандартной вакуумной изоляционной панели VIP размером 600 мм × 400 мм показало, что эффективное значение λ всей панели увеличилось с базового значения 4,0 мВт/(м·К) при стандартном 5-миллиметровом ламинированном крае. Новая конструкция со скошенными краями и интегрированными стекловолоконными прокладками позволила существенно снизить эти потери, достигнув более низкого эффективного значения λ всей панели.

Класс III: Невакуумные нанокompозитные маты и плиты

Этот класс предназначен для модернизации зданий, когда обеспечение вакуумной герметичности является нецелесообразным. Волокнистые аэрогелевые маты (например, аэрогель кремнезёма, встроенный в матрицу из нетканого полиэфирного волокна) продемонстрировали сильную линейную корреляцию ($R^2 = 0,92$) между нагрузкой аэрогеля и теплотехнической эффективностью. Нагрузка 60% по массе аэрогеля обеспечила значение λ , тогда как нагрузка 80% по массе позволила достичь более низкого значения λ при толщине материала 10 мм.

Появляющиеся на рынке биокompозиты представляют собой многообещающий компромисс с точки зрения экологической устойчивости. Жёсткие плиты, изготовленные из метилированной лигниновой пены, пропитанной 10 об.% частицами кремнезёма-аэрогеля, достигли значений λ , превосходящих показатели

традиционных древесноволокнистых плит ($\lambda \sim 40 \text{ мВт/(м·К)}$), но уступающих синтетическим композитам. Однако их оценка жизненного цикла (LCA) показала 60-процентное снижение эквивалента выбросов углекислого газа ($\text{CO}_2\text{-eq}$) по сравнению с полиизоциануратной пеной на нефтехимической основе с эквивалентным коэффициентом R .

Заключение

В заключение, область нанокompозитной изоляции переходит от фазы, ориентированной на максимизацию одного свойства (минимального λ), к системной инженерной дисциплине, обеспечивающей баланс между теплофизическими характеристиками, технологичностью, долговечностью и многофункциональностью. Сближение передовых вычислительных технологий проектирования, устойчивой химии и точного микропроизводства определит, смогут ли эти замечательные лабораторные материалы оправдать надежды на формирование новой парадигмы в области глобальной энергоэффективности.

Литература

1. Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761-769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>
2. Berardi, U. (2021). The impact of aging and environmental conditions on the effective thermal conductivity of several foam materials. *Energy*, 215, 119099. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119099>
3. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014). На пути к тепловой суперизоляции зданий на основе аэрогеля: всесторонний обзор. *Обзоры возобновляемой и устойчивой энергии*, 34, 273-299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
4. Директива (ЕС) 2024/... Европейского парламента и Совета, изменяющая Регламент (ЕС) № 305/2011 в отношении оценки показателей устойчивого развития строительных

- изделий. (2024). Официальный журнал Европейского Союза.
5. Фрикке, Дж., и Эммерлинг, А. (1992). Аэрогели. Журнал Американского керамического общества, 75(8), 2027–2036. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb04461.x>
 6. Гао, Т., Йелле, Б. П., Сандберг, Л. И. К., и Густавсен, А. (2013). Монодисперсные полые наносферы из кремнезема для теплоизоляционных материалов: синтез, характеристика и оценка жизненного цикла. ACS Applied Materials & Interfaces, 5(3), 761–767. <https://doi.org/10.1021/am302303b>
 7. Гарнье, К., Мунир, Т., и Кидд, А. (2022). Оценка жизненного цикла (LCA) нанокompозитных теплоизоляционных материалов: метаанализ. Серия конференций IOP: Науки о Земле и окружающей среде, 1078(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012045>
 8. Международное энергетическое агентство (МЭА). (2023). Здания. Париж: МЭА. Получено с <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
 9. ISO 8302:1991. (1991). Теплоизоляция — Определение теплового сопротивления в установившемся режиме и связанных с ним свойств — Устройство с защищенной горячей пластиной. Международная организация по стандартизации.
 10. Jelle, B. P. (2011). Традиционные, современные и будущие теплоизоляционные материалы и решения для зданий — свойства, требования и возможности. Энергия и здания, 43(10), 2549–2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
 11. Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2014). Вакуумные теплоизоляционные панели: обзор современного состояния и перспективы будущих исследований. Прикладная энергетика, 116, 355–375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.032>
 12. Kistler, S. S. (1931). Когерентные расширенные аэрогели и желе. Nature, 127(3211), 741–741. <https://doi.org/10.1038/127741a0>