

# ЗНАЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ

П. М. Жук, канд. техн. наук, профессор кафедры «Архитектурное материаловедение»,  
Московский архитектурный институт (Государственная академия)

**Ключевые слова:** теплоизоляция зданий, теплоизоляционные материалы, вакуумные изоляционные панели, летняя теплозащита

При проектировании энергоэффективных зданий принципиально важно решать такие энергосберегающие задачи, как снижение теплопотерь через конструкции здания, использование энергии из возобновляемых источников, а также повышение энергоэффективности всех функциональных систем, включая инженерное оборудование. Однако при выборе технологий, повышающих энергоэффективность здания, следует также обращать внимание на материалы, применяемые в этих технологиях. Сегодня созданы инновационные материалы, которые выполняют функции, связанные с выработкой энергии безопасными для окружающей среды методами, сохраняют тепло в здании и даже участвуют в утилизации излишков тепла при летней теплозащите.



## Материалы, используемые в области генерации энергии

С точки зрения систем, позволяющих выработку энергии, стоит рассмотреть варианты выбора материала для солнечных элементов, а также экспериментальные образцы панелей с водорослями.

### Кристаллический кремний

На рынке солнечных батарей уже десятки лет лидирует кристаллический кремний. За этот период в результате исследований и разработок коэффициент полезного действия (КПД) кремниевых элементов удалось довести до 25% (с теоретическим пределом, рассчитанным по ширине запрещенной зоны, в 33%).

В основе конструкции фотоэлемента располагается поверхность соприкосновения двух типов кремния. Солнечный свет попадает на кремний через прозрачную верхнюю часть элемента. Положительный электрод выполняется из металла, реализуя также функции ребер жесткости. В качестве отрицательного электрода выступает металлическая подложка, находящаяся в непосредственном контакте с кремниевыми пластинами. При этом панель может быть собрана путем объединения фотоэлектрических ячеек посредством последовательных или параллельных соединений.

КПД выпускаемых промышленностью солнечных элементов варьируется в зависимости от организации атомов кремния:

- от 15–25% у монокристаллических
- до 12–17% у поликристаллических
- 6–10% у аморфных.

Сочетание кремниевых элементов с тонкопленочными из теллурида кадмия (CdTe) позволяет достичь КПД 8–12%.

### Соединения меди, индия и селена

Для изготовления солнечных элементов применяется также технология с использованием в качестве солнечных ячеек соединения меди, индия и селена ( $\text{CuInSe}_2$ ), которое по кристаллической структуре относится к минералу халькопириту. Высокая эффективность ячеек с прямопереходным полупроводником достигается путем оптимизации запрещенной зоны.

Кроме того, медь-индий-диселенид и его твердые растворы  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  имеют максимально широкую спектральную полосу поглощения солнечного излучения, что позволяет повышать и контролировать КПД фотообразования, превышающий 20%.

Серьезные исследования посвящены типам подложек для тонкопленочных солнечных элементов на ос-



Рис. 1. Экспериментальное здание с панелями, в которых растут водоросли, представленное на строительной выставке в Гамбурге: а) фасад здания; б) панели с водорослями

нове халькопирита. В частности, хорошо изучены подложки из стекла, ведутся исследования использования в качестве подложек металлических и полиамидных пленок [1].

Кроме исследований по внедрению новых материалов в качестве подложки для халькопиритовых элементов ведутся эксперименты по использованию нового материала для батарей – соединений структуры перовскита (например, искусственного перовскита с галогенидом свинца или индия галлия арсенида). За счет изменения состава ингредиентов можно менять ширину запрещенной зоны, что позволит повысить КПД перовскитовых элементов.

Важно, что за счет предлагаемых материалов можно успешно повышать КПД известных кремниевых элементов. Например, перовскиты используют более коротковолновую часть солнечного спектра по сравнению

с кремнием, генерируя электроны более высокой энергии. Нанося слой перовскита на слой кремния, можно получить эффект улавливания большей части солнечного спектра. В качестве технологий нанесения используют метод соиспарения, а также струйную печать [2].

### Использования водорослей

Еще один способ использования материалов, являющихся источниками энергии, продемонстрирован разработчиками из Германии (рис. 1). Водоросли в специально сконструированных панелях второго фасада развиваются и размножаются до момента их сбора, при котором их изымают из привычной среды и помещают в устройство, где они в процессе брожения вырабатывают биогаз. При этом по производительности по биогазу водоросли намного превосходят виды растительности, произрастающие в почве.

Кроме того, фасад собирает энергию, поглощая свет, который не используется водорослями. Эта энергия направляется на нагревание воды или может накапливаться с помощью теплообменников в системе сохранения энергии здания.

Таким образом, возникает комплексный подход по использованию энергии, собираемой юго-западным и юго-восточным фасадами экспериментального здания на строительной выставке в Гамбурге (рис. 1).

### Теплоизоляция зданий с применением материалов из природного сырья

Важной тенденцией в использовании высокоэффективных теплоизоляционных материалов является обеспечение их безопасности на протяжении всего жизненного цикла.

В частности, с точки зрения дружелюбности по отношению к окружающей среде перспективным направлением в материаловедении теплоизоляционных систем становится распространение материалов из природного возобновляемого сырья.

На рынке теплоизоляции кроме соломы и торфоблоков предлагаются варианты теплоизоляции в виде плит и матов из таких материалов, как целлюлозные волокна или хлопья, конопля, льняное волокно, овечья шерсть, кокосовый войлок, тростник, лен и даже морская трава посидония (*Posidonia oceanica*) [3, 4].

### Использования посидонии

Листья и побеги этого морского травянистого растения выбрасываются морем на берег и осенью, зимой и ранней весной в большом количестве накапливаются на пляжах и по всему побережью Средиземного моря и юга Австралии в виде причудливых шаров диаметром от 2 до 10 см.

Попытки найти им применение до этого были связаны с использованием в качестве упаковочного материала и в качестве сырья для грубых тканей. В Северной Африке также встречались случаи применения их для покрытия крыш. В настоящее время предложено использовать волокна, полученные из шаров посидонии, в качестве эффективного теплоизоляционного материала со средней плотностью 65–75 кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом теплопроводности 0,0388 Вт/(м·К).

Очень важным эксплуатационным показателем теплоизоляционного материала на основе морской травы также является невысокое содержание солей (0,5–2,0%), что определяет небольшую гигроскопичность, а также отсутствие агрессивных свойств материала с точки зрения химической коррозии.

**Таблица** Основные показатели теплоизоляционных материалов из растительных волокон

Наименование показателя	Материалы на основе волокна из морской травы <i>Posidonia oceanica</i>	Материалы на основе волокна из морской травы <i>Zostera marina</i>	Плиты на основе льняного волокна
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	65–75	25–85	25–34
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,0388	0,038–0,087	0,034–0,037
Коэффициент паропроницаемости	1–2*	–	0,4 мг/(м·ч·Па)
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	2 500	1 550–1 700	1 500
Группа горючести	–	Горючие	Г1
Воспламеняемость	B2**	B1	–

\* Соответствует коэффициенту сопротивления паропроницаемости  $\mu$ , определяемому согласно стандарту ISO 10456:2007 Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.

\*\* Класс пожарной безопасности определяется по стандарту DIN 4102.



**Рис. 2.** Новое строительство в Мюнхене (Германия) с использованием планок из древесины в качестве защиты вакуумных изоляционных панелей (фото Lichtblau Architects)

Оценивая жизненный цикл материала NeptuTherm® на основе волокон посидонии, специалисты Института химической технологии общества Фраунгофера (г. Ффинцталь, Германия) утверждают, что показатели первичных энергозатрат на производство материала – 37–50 кВт•ч/м<sup>3</sup> в зависимости от использованной технологии. Эти параметры, по мнению разработчика материала профессора Рихарда Майера, свидетельствуют о том, что энергозатраты по жизненному циклу материала на основе природных волокон в 30 раз меньше, чем для аналогов из стеклянной или каменной ваты [5].

Если посидония распространена на побережье Средиземного моря, то на Черном море активно может использоваться для теплоизоляции камка (морская трава, взморник – *Zostera marina*).

#### **Теплоизоляционные материалы из льна**

В отечественной практике популярность набирают теплоизоляционные материалы из льна, которым различные производители дают фирменные названия («Термолен», «Экотерм», «Экотеплин», «Эколен-Экоплат», Val-Flax и др.).

Известно, что льняное волокно является природным антисептиком. Это свойство сохраняется и материалом на основе такого волокна, а в сочетании с высокими показателями паропроницаемости позволяет прогнозировать работу такого теплоизоляционного материала в качестве фильтра при условии его соответствующего расположения и использовании подходящих конструктивных материалов. Льняное волокно, в отличие от многих других типов волокон, антистатично.

Теплоизоляционные изделия на основе льняного волокна могут содержать связующие компоненты (например, крахмал), а могут изготавливаться без связующего. При этом волокна льна могут скрепляться друг с другом за счет трения.

Современная технология изготовления матов из льна позволяет сделать процесс менее энергоемким. Сначала механическим способом производится удаление эпидермиса и древесной части без разволокнения лубоволокнистых пучков, что позволяет снизить потребность в связующем (его требуется лишь 2,5–5,0%).

Важным элементом технологии является аэроформирование матов с последующей термофиксацией. Аэроформирование используется вместо чесального оборудования, которое является частью традиционной технологии [6].

#### **Показатели теплоизоляционных материалов из растительных волокон**

Важнейшим показателем материалов на основе природных волокон является их удельная теплоемкость. Этот показатель сказывается на тепловом комфорте помещения в силу более высокой тепловой инерции. С этой точки зрения изменение температуры в помещениях как в зимний, так и в летний период происходит более плавно, поскольку у материалов на основе минерального волокна удельная теплоемкость составляет приблизительно 800 Дж/(кг•К). В таблице приведены основные показатели теплоизоляционных материалов из растительных волокон, что позволяет сопоставлять современные материалы при их выборе для конкретных проектов.

#### **Негативный момент**

Тенденция совершенствования сырьевой базы путем использования для теплоизоляционных материалов растительного сырья является перспективой рынка утеплителей. В то же время необходимо отметить, что стремление к замене сырья на природное, несмотря на безопасность самих теплоизоляционных материалов, может иметь и негативный эффект для окружающей среды. Напри-

мер, при изготовлении пенопласта из растительных масел (например, из кукурузного) количество необходимой для промышленного производства кукурузы столь велико, что может потребоваться сведение лесов и внесение в почву огромного количества вредных химикатов.

### Вакуумные изоляционные панели

Повышение энергетической и экологической эффективности применяемых для теплоизоляции материалов является одной из доминирующих тенденций в современном строительстве. Если ранее речь шла о том, что хуже всего тепло проводит воздух с  $\lambda = 0,022 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , то в настоящее время имеется опыт использования вакуумных панелей.

В настоящее время все большее распространение получают вакуумные изоляционные панели с порошковым наполнителем из пирогенного диоксида кремния (Vakuum-Isolations-Paneele, VIP), являющиеся одним из наиболее эффективных материалов для теплоизоляции. Такие материалы предлагает на рынке значительное количество производителей.

Структурно эти материалы построены по принципу работы термоса и включают в себя сердечник из мезо- или микропористого пирогенного диоксида кремния, который для сохранения формы и прочности помещается в оболочку из холста, выполненного из волокон [8]. Пирогенный диоксид кремния спрессовывается, покрывается оболочкой. Затем из него откачивается воздух, и элементы свариваются. Наружной оболочкой являются пленки из металлизированного полимерного материала.

Коэффициент теплопроводности вакуумных изоляционных панелей составляет  $0,0022 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Такие материалы позволяют создавать ограждающие конструкции в 8–10 раз меньшей толщины по сравнению со стенами с использованием обычных теплоизоляционных материалов.

Долгое время основным недостатком таких панелей считали их чувствительность к механическим воздействиям. Сейчас существуют сэндвич-системы, которые позволяют минимизировать возможное механическое повреждение вакуумных изоляционных панелей или осуществлять их быструю замену в случае потери эффективности [9].

На рис. 2 приведен пример использования вакуумных изоляционных панелей для нового здания, в котором предусматривается защита панелей при помощи планок из древесины. Использование древесины повысило сопротивление теплопередаче конструкции. В случае повреждения VIP-панелей конструкция позволяет легко осуществить их замену. По сравнению с использованием традиционных теплоизоляционных материалов полезная площадь дома увеличилась на  $15 \text{ м}^2$ .

### Борьба с передачей теплоты излучением

Важной с точки зрения повышения эффективности теплоизоляции работой является борьба с передачей тепла излучением. В частности, изменения в составе пенополистирольных пенопластов также привели к существенному эффекту снижения теплопотерь.

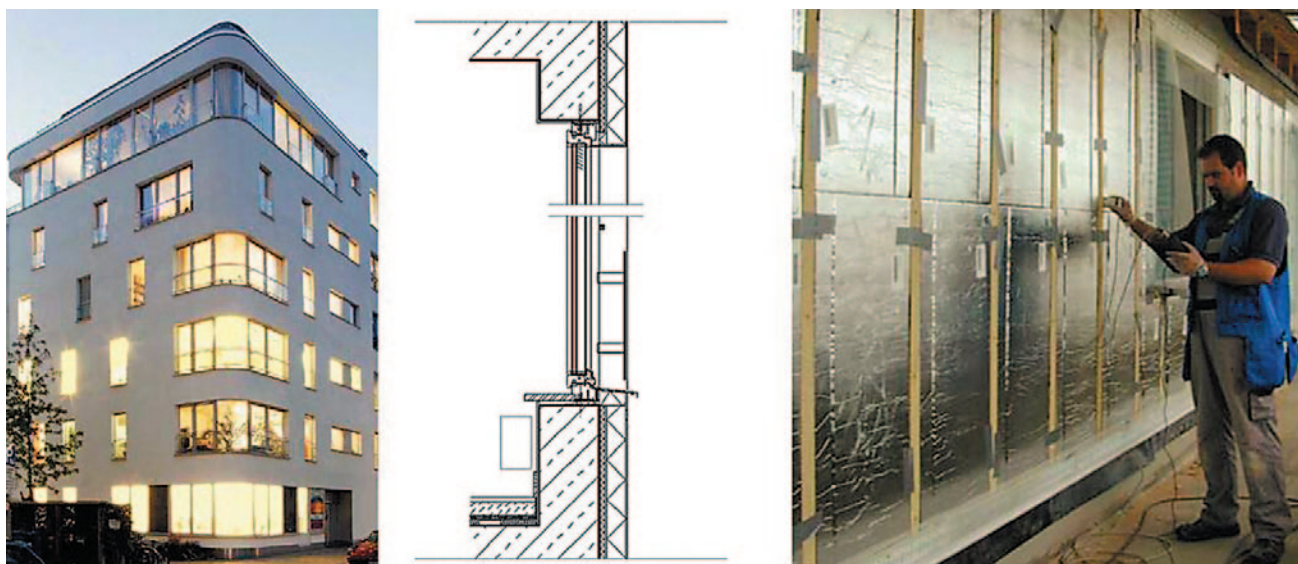


Рис. 3. Новое офисное здание с наружной теплоизоляцией из вакуумных изоляционных панелей (толщина 20 мм) и пенополиуретана (фото Sascha Kletzsch, Martin Pool)

Если при использовании обычного вспененного или экструзионного полистирола в качестве теплоизоляционного материала уже можно было добиться серьезных результатов по снижению теплопроводности конструкции, то в настоящее время все чаще используют вспененный полистирол с частицами графита, встроенного в тончайшие стенки ячейки. За счет отражения инфракрасного переизлучения в пустотах материал с графитовыми частицами может обеспечить теплопроводность на 20% меньше, чем обычный полистирольный пенопласт. За счет низкой теплопроводности можно до 50% уменьшить использование дорогостоящего сырья. Вместе со снижением содержания сырьевых материалов удастся сделать тоньше и саму ограждающую конструкцию.

В связи с этим специалисты аудиторского концерна TÜV Rheinland (Кельн, Германия) провели расчеты экологической эффективности материала Neopor®, показавшие, что на 1 м<sup>2</sup> наружной теплоизоляционной композитной системы пенопласт с частицами графита демонстрирует в сравнении с теплоизоляцией из минеральной ваты преимущества по показателям затрат и воздействий на окружающую среду с учетом жизненного цикла продукции [10].

### Борьба с мостиками холода

Принципиальным направлением в обеспечении теплозащиты зданий является борьба с мостиками холода. Данная задача должна решаться на нескольких уровнях: геометрия и форма здания, устройство примыканий и стыков, система крепления и нарушения целостности теплоизоляционных слоев и т. д.

Выделяют следующие основные способы борьбы с мостиками холода:

- устройство дополнительной ограждающей конструкции, термически отделенной от основной стены;
- термическое отделение консолей и иных выходящих наружу элементов.

Если для возведения отдельной конструкции требуются серьезные затраты, то изоляция консольных элементов (например, балконных плит) может быть выполнена с использованием специальных элементов, позволяющих организовать барьер для прохождения тепла через консольную конструкцию.

### Летняя теплозащита зданий

Современной тенденцией в обеспечении энергетической эффективности зданий является летняя теплозащита. На эту проблему также можно взглянуть с точки зрения материаловедения. Аккумулировать избыточную энергию при нагреве конструкций здания в летний период можно за счет компонентов, обладающих изменяющимся фазовым состоянием.

В качестве таких компонентов можно использовать парафины в полимерной микрокапсуле, которая обеспечивает защиту от просачивания содержимого наружу и способна воспринимать изменения объема содержимого при фазовых переходах, связанных с изменением температуры.

Поскольку температура фазового перехода парафинов составляет 23–26 °С, это позволяет сохранить прохладу в помещениях с использованием материалов, в которые



Здание выполнено из легких древесных рам с частичной вакуумной теплоизоляцией и внутренней отделкой с использованием гипсокартонных листов с компонентом Micronal®. Основной задачей, успешно решенной в проекте, было обеспечение комфортной температуры внутри помещений на уровне 23 °С при активном энергообеспечении дома солнечной энергией.

Рис. 4. Жилое здание, представленное на конкурс «Солар-Декатлон» в 2008 году (фото из [11])

В качестве несущих конструкций использовались стальные контейнеры, а внутренняя отделка выполнена гипсокартонными листами с добавкой компонента Micronal®. Достигнута цель обеспечения температурного комфорта в помещениях без активного их охлаждения.



Рис. 5. Школа в г. Дикирх, Люксембург (фото из [11])

добавлен такой компонент. Это, в свою очередь, приводит к созданию комфортной среды в помещениях и существенному снижению затрат на кондиционирование. На рис. 4, 5 приведены примеры зданий, в интерьерах которых использованы материалы с технологией полимерных микрокапсул с парафином Micronal® [11].

Таким образом, в повышении энергоэффективности зданий активную роль наряду с архитектурно-планировочными решениями, инженерными системами, конструктивными элементами и экономико-социальными подходами играют материаловедческие аспекты, позволяющие найти нетривиальные выходы из сложных ситуаций при проектировании новых и реконструкции существующих зданий.

В частности, грамотное использование материалов помогает найти выход при решении принципиальных вопросов тепловой защиты зданий:

- получение энергии из альтернативных источников;
- формирование теплоизоляционного слоя из эффективных материалов, обладающих хорошими экологическими показателями по жизненному циклу;
- уменьшение количества мостиков холода;
- летняя теплозащита и др.

Подходы к решению задач теплозащиты, как правило, связаны с использованием ранее не учитывавшихся показателей (например, удельной теплоемкости материала, сравнимости длины свободного пробега молекулы газа и размера полости, возможности фазового перехода и др.). В связи с этим стоит ориентироваться на появление все более новых материалов с уникальными характеристиками, позволяющих добиваться успехов в проектировании и строительстве энергоэффективных зданий.

### Литература

1. Рудь В. Ю., Рудь Ю. В., Гременок В. Ф., Теруков Е. И., Байрамов Б. Х., Song Y. W. Фоточувствительность тонкопленочных солнечных элементов ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>/Mo, полученных на различных подложках // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 2.
2. Stauth D. Inkjet printing could change the face of solar energy industry (<http://oregonstate.edu/ua/ncs/node/14094>).
3. Weiß R.-G., Paproth O. Leitfaden Ökologische Dämmstoffe. Wärmedämmung für Wohngesundheit und Energieeinsparung. NABU Bundesverband. Naturschutzbund Deutschland e. V. Bonn, 2001.
4. Becker N. Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). Berlin, 2014.
5. Was ist NeptuTherm® (<http://www.neptutherm.com/index.php?besondere-eigenschaften>).
6. Борисов Ю. И. Новые технологии в производстве материалов изо льна // Технический текстиль. 2003. № 6.
7. Черкашин А. Порошковая вакуумная теплоизоляция // БСГ. Строительная газета. 2012. 27 февраля.
8. Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Panels (VIP). Institut für Energie, FHBB, Muttenez; ESU-services, Uster.
9. Johansson P. Vacuum Insulation Panels in Buildings. Literature review. Report in Building Physics. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2012.
10. Neopor® Professional Broschure. BASF CE, Ludwigshafen, 2001.
11. Micronal® PCM. Katalog für Architekten und Planer. BASF CE Ludwigshafen, 2010. ■