

Емелин Антон Валерьевич

кандидат технических наук, доцент

Кубанский государственный аграрный университет

им. И.Т. Трубилина

РФ г. Краснодар

Кравченко Михаил Сергеевич

студент

Кубанский государственный аграрный университет

им. И.Т. Трубилина

РФ г. Краснодар

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Проблема сохранения тепла в помещениях рассматривается в работе не просто как вопрос бытового комфорта, но как комплексная физическая задача. Проанализированы ключевые механизмы переноса тепловой энергии через ограждающие конструкции: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. Особое внимание уделено физическим характеристикам современных утеплителей, таких как минеральная вата, пенополистирол и газобетон. На основе сравнения коэффициентов теплопроводности (λ) показана прямая зависимость эффективности изоляции от плотности и пористой структуры вещества. В статье приводятся расчетные данные и сравнительные таблицы, демонстрирующие динамику снижения теплопотерь при использовании различных материалов. Вследствие этого делается вывод о том, какой тип изоляции наиболее оправдан с физической точки зрения для конкретных климатических условий, и как законы термодинамики помогают экономить энергоресурсы.

Ключевые слова: теплоизоляция, коэффициент теплопроводности, энергоэффективность, теплопотери, физика строительства, термодинамика, изоляционные материалы.

Annotation. The problem of heat retention in premises is considered in the paper not merely as a matter of household comfort, but as a complex physical task. Key mechanisms of thermal energy transfer through building envelopes - thermal conductivity, convection, and thermal radiation - were analyzed. Special attention was paid to the physical characteristics of modern insulators, such as mineral wool, expanded polystyrene, and aerated concrete. Based on the comparison of thermal conductivity coefficients (λ), a direct dependence of insulation efficiency on the density and porous structure of the substance is shown. The article presents calculated data and comparative tables demonstrating the dynamics of heat loss reduction when using various materials. As a consequence, a conclusion is drawn regarding which type of insulation is most justified from a physical point of view for specific climatic conditions, and how the laws of thermodynamics help save energy resources.

Keywords: thermal insulation, thermal conductivity coefficient, energy efficiency, heat loss, building physics, thermodynamics, insulation materials.

В современном мире вопросы энергосбережения перестали быть исключительно экономической задачей и перешли в разряд глобальных экологических и инженерных вызовов. Огромная доля энергетических ресурсов, добываемых человечеством, тратится на поддержание комфортной температуры внутри жилых и промышленных помещений. С точки зрения физики, любое здание представляет собой незамкнутую термодинамическую систему, которая непрерывно взаимодействует с окружающей средой. В зимний период, когда разница температур внутри и снаружи помещения достигает десятков градусов, возникает мощный тепловой поток, направленный из отапливаемой зоны на улицу [1]. Если не создавать искусственных преград для этого потока, затраты на отопление становятся колоссальными, а эффективность использования топлива стремится к нулю.

Вследствие этого изучение физических основ теплоизоляции становится фундаментом для проектирования любых сооружений.

Проблема сохранения тепла базируется на фундаментальных законах природы, в первую очередь - на втором начале термодинамики. Самопроизвольная передача энергии всегда происходит от более нагретого тела к менее нагретому, и остановить этот процесс полностью невозможно, его можно лишь замедлить. Именно в замедлении скорости передачи джоулей тепловой энергии через стены, кровлю и фундамент и заключается суть теплоизоляции. Долгое время эта задача решалась экстенсивным путем: увеличением толщины кирпичной кладки или использованием массивных деревянных брусьев. Однако современные требования к скорости строительства и нагрузке на фундамент делают такие методы устаревшими. На смену им приходят материалы, работа которых основана на глубоком понимании молекулярной физики и процессов теплопереноса в газах и твердых телах.

Важно понимать, что «теплоизоляция» - это не просто слой ваты или пенопласта, наклеенный на фасад. Это сложная физическая система, работающая на стыке трех механизмов передачи тепла: теплопроводности, конвекции и излучения. Каждый из этих процессов вносит свой вклад в общие теплопотери здания. Например, плотные материалы, такие как бетон или металл, отлично проводят тепло из-за плотной упаковки атомов и наличия свободных электронов, что делает их «мостиками холода». В то же время газы, в частности обычный воздух, являются плохими проводниками тепла, если исключить их активное перемешивание [2]. Именно этот физический принцип - заключение неподвижного воздуха в ячейки, волокна или поры твердого каркаса - лежит в основе большинства утеплителей.

Однако на практике идеальных условий не существует. В реальных конструкциях на физические свойства материалов влияют влажность, давление, перепады температур и механические нагрузки. Вода, попадая в поры утеплителя, кардинально меняет картину: так как теплопроводность воды в десятки раз выше, чем у воздуха, влажный материал практически мгновенно теряет свои защитные свойства. Это делает вопрос гидроизоляции и пароизоляции неотъемлемой частью теплофизического расчета. Кроме того, нельзя игнорировать и лучистый теплообмен,

который играет значительную роль, особенно в зонах остекления и на кровельных поверхностях.

В итоге, грамотный выбор теплоизоляционного решения невозможен без детального анализа внутренней структуры вещества и процессов, происходящих в толще ограждающих конструкций. Попытки игнорировать физику приводят к появлению конденсата, разрушению стен и неконтролируемым утечкам тепла. Для того чтобы разобраться, как именно работают современные методы защиты зданий от выхолаживания, необходимо рассмотреть механизмы переноса энергии на микроуровне. Далее будет проведен теоретический анализ трех основных видов теплопередачи и того, как они реализуются в строительных материалах.

Любой процесс теплоизоляции строится на противодействии трем фундаментальным механизмам передачи тепловой энергии: теплопроводности, конвекции и излучению. Каждый из этих процессов описывается своими законами и по-разному проявляется в различных материалах. Понимание физической природы этих явлений позволяет не просто выбирать утеплитель наугад, а делать осознанный выбор на основе расчетных данных.

Теплопроводность - это процесс передачи энергии от одной молекулы к другой внутри вещества без макроскопического перемещения самих частиц. В твердых телах тепло распространяется за счет колебаний атомов кристаллической решетки и движения свободных электронов. Количественно этот процесс описывается законом Фурье, согласно которому плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры и коэффициенту теплопроводности материала λ :

$$q = -\lambda dT$$

Здесь q - плотность потока тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$), dT/dx - изменение температуры на единицу толщины. Коэффициент λ измеряется в $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и является главной характеристикой любого теплоизоляционного материала [3]. Чем меньше значение λ , тем хуже материал проводит тепло, а значит - лучше изолирует. Например, у стали $\lambda \approx 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, у кирпича - около $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а у пенополистирола - всего $0,03-0,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Эта колоссальная разница объясняется структурой вещества: в металлах

энергия передается мгновенно через облако электронов, а в пористых материалах основной объем занят воздухом, который сам по себе плохо проводит тепло.

Второй важный механизм - конвекция. Она связана с переносом энергии движущимися потоками газа или жидкости. В строительстве конвекция проявляется двояко: снаружи здания ветер обдувает стены, унося от них тепло, а внутри - воздух циркулирует вблизи холодных поверхностей, также увеличивая теплопотери. Конвективный теплообмен описывается законом Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

где α - коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), A - площадь поверхности, T_1 и T_2 - температуры поверхности и окружающей среды. Для борьбы с конвекцией используются материалы с закрытой ячеистой структурой, где воздух зафиксирован и не может свободно перемещаться. Это особенно критично для утеплителей, работающих в условиях сильных ветровых нагрузок.

Третий механизм - тепловое излучение. Любое тело с температурой выше абсолютного нуля испускает электромагнитные волны инфракрасного диапазона. Интенсивность этого излучения определяется законом Стефана-Больцмана:

$$P = \epsilon \sigma A T^4$$

где ϵ - коэффициент излучательной способности поверхности (от 0 до 1), $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Лучистый теплообмен особенно значителен через остекление и кровлю. Для его снижения применяют отражающие покрытия (фольгированные мембраны) или специальные стекла с низкоэмиссионным напылением [4].

В реальных условиях все три процесса действуют одновременно, создавая сложную картину теплопереноса. Общее термическое сопротивление многослойной конструкции рассчитывается как сумма сопротивлений каждого слоя:

$$R_{\text{общ}} = \sum d_i \lambda_i$$

где d_i - толщина слоя, λ_i - его теплопроводность.

Чем выше $R_{\text{общ}}$, тем эффективнее защита здания от теплопотерь. Вследствие этого задачей инженера становится подбор такой комбинации материалов, которая обеспечит требуемое сопротивление теплопередаче при минимальной толщине и

стоимости конструкции. Для наглядной демонстрации того, как теория воплощается на практике, необходимо сравнить реальные характеристики популярных утеплителей и рассчитать их эффективность в конкретных климатических условиях.

В теоретической части было установлено, что ключевым параметром, определяющим эффективность удержания тепла, является коэффициент теплопроводности (λ) [5]. Для практического подтверждения теоретических выкладок было проведено сравнение физических характеристик пяти наиболее распространенных в строительстве материалов: железобетона (как представителя тяжелых конструктивных материалов), керамического полнотелого кирпича, газобетона (ячеистого бетона), минеральной ваты и экструдированного пенополистирола (XPS).

Целью расчета являлось определение необходимой толщины ограждающей конструкции (d) для обеспечения нормативного сопротивления теплопередаче. В качестве целевого показателя было выбрано значение $R_{req}=3.5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт} \cdot \text{К}/\text{Вт}$, что соответствует современным нормам энергоэффективности для жилых зданий в климатической полосе средней полосы России (например, для Московского региона).

Исходные физические данные материалов, использованные в расчете, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Физико-технические характеристики исследуемых материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Коэфф. теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Тип материала
Железобетон	2500	2.04	Конструкционный
Кирпич керамический	1800	0.70	Конструкционный
Газобетон (D500)	500	0.12	Конструкционно-теплоизоляционный

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Коэфф. теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Тип материала
Минеральная вата	50	0.040	Теплоизоляционный
Пенополистирол (XPS)	35	0.032	Теплоизоляционный

Примечание: значения λ взяты для условий эксплуатации Б (влажный режим), что соответствует реальным условиям работы конструкции.

Расчет производился по формуле, выведенной из закона Фурье:
 $d = R_{\text{req}} \cdot \lambda$

В результате вычислений были получены данные о толщине однородной стены, необходимой для достижения заданного уровня теплозащиты. Для визуализации колоссальной разницы в изолирующей способности материалов была построена сравнительная диаграмма.

Необходимая толщина стены для $R = 3.5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$

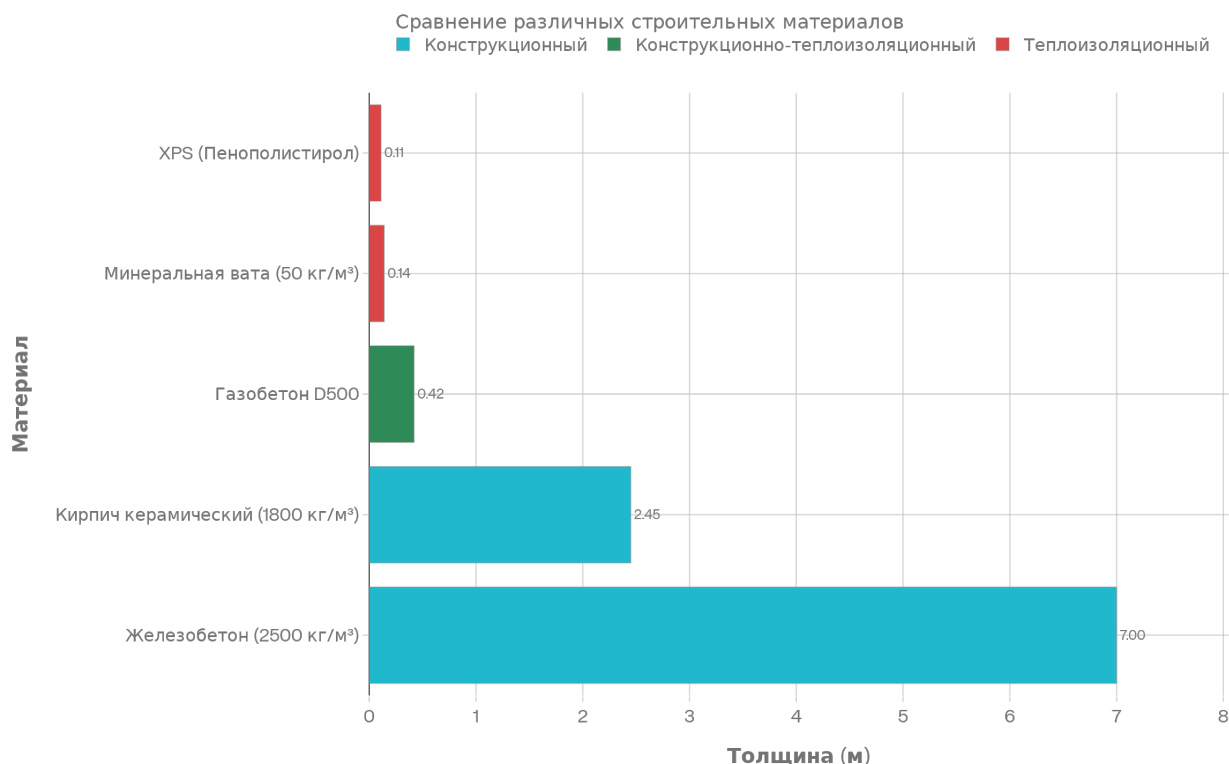


Рис 1 - Сравнительная диаграмма необходимой толщины различных материалов для обеспечения теплового сопротивления $R = 3.5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$

Анализ полученной диаграммы (Рис. 1) позволяет сделать однозначный вывод: использование исключительно конструкционных плотных материалов для решения задач теплоизоляции физически неоправданно. Чтобы обеспечить норму $R=3.5$, толщина стены из железобетона должна составлять 7 метров, а из полнотелого кирпича - почти 2.5 метра [6]. Возведение сооружений с такими параметрами невозможно ни экономически, ни технически из-за гигантской нагрузки на фундамент и расхода материалов.

В то же время современные утеплители справляются с этой задачей при толщине слоя всего 11–14 см. Это наглядно демонстрирует обратную зависимость между плотностью вещества и его теплопроводностью: чем меньше атомов вещества и больше пор с неподвижным газом содержится в единице объема, тем выше энергоэффективность.

Однако, помимо толщины, критически важным параметром является масса конструкции. Инерционность здания (способность накапливать тепло) зависит от

массы, но избыточный вес ведет к удорожанию строительства. В Таблице 2 приведен расчет массы 1 квадратного метра стены требуемой толщины для каждого материала.

Таблица 2. Расчетная масса 1 м² ограждающей конструкции при R=3.5R

Материал	Необходимая толщина (м)	Масса 1 м ² стены (кг)
Железобетон	7.00	17 500
Кирпич керамический	2.45	4 410
Газобетон (D500)	0.42	210
Минеральная вата	0.14	7
Пенополистирол (XPS)	0.11	3.8

Вследствие этого становится очевидным, что оптимальным решением с точки зрения физики является использование многослойных конструкций. В таких системах тонкий слой прочного материала (бетон, кирпич) берет на себя механическую нагрузку, а слой утеплителя обеспечивает необходимое термическое сопротивление. Это позволяет снизить массу здания в десятки раз при сохранении комфортного микроклимата. Например, замена кирпичной стены толщиной 2.5 метра на комбинацию «25 см кирпича + 12 см XPS» обеспечивает ту же теплозащиту, но снижает вес квадратного метра стены с 4410 кг до ≈ 454 кг.

В итоге, проведенный анализ доказывает, что эффективность теплоизоляции зданий определяется не толщиной стен, а правильным подбором материалов с низкой теплопроводностью, что позволяет минимизировать потери энергии за счет подавления кондуктивного теплообмена.

В ходе выполнения работы была детально проанализирована физическая природа процессов, приводящих к потере тепловой энергии зданиями и сооружениями. В конечном счете, проблема теплоизоляции сводится не к простому «утеплению» стен, а к решению сложной термодинамической задачи по минимизации энтропии системы. Было установлено, что эффективность любого ограждающего контура зависит от способности материала сопротивляться трем видам

теплопередачи: теплопроводности, конвекции и излучению. При этом доминирующим фактором в твердых телах остается именно теплопроводность, которая напрямую коррелирует с плотностью и внутренней структурой вещества.

На основании проведенных расчетов и построенных сравнительных диаграмм был подтвержден факт, что использование традиционных конструкционных материалов (железобетон, полнотелый кирпич) в качестве единственного барьера для холода является физически и экономически несостоятельным в современных условиях [7].

Вследствие этого был сделан вывод о безальтернативности применения многослойных конструкций, где функции разделены: несущий каркас обеспечивает прочность, а специализированные пористые утеплители (минеральная вата, пенополистирол) создают термический барьер. Именно наличие в структуре утеплителей огромного количества микропор, заполненных неподвижным газом, позволяет им снижать тепловой поток в десятки раз эффективнее камня или бетона. Фактически, лучшим изолятором является воздух, а задача строительного материала - лишь зафиксировать его в неподвижном состоянии.

Также в работе было отмечено влияние влажности на теплофизические свойства. Вода, обладая высокой теплопроводностью, при попадании в поры материала способна свести на нет все усилия по утеплению. Из этого следует, что физика теплоизоляции неразрывно связана с физикой влагопереноса: без грамотной пароизоляции и вентиляции даже самый эффективный утеплитель перестанет выполнять свою функцию.

В итоге, грамотное проектирование зданий - это поиск баланса между массой, толщиной стен и их термическим сопротивлением. Понимание законов Фурье и Ньютона-Рихмана позволяет переходить от интуитивного строительства к точному инженерному расчету, что в масштабах страны ведет к колоссальной экономии энергетических ресурсов и снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду. Теплоизоляция перестает быть вопросом толщины стены и становится вопросом высоких технологий и глубокого понимания физики материалов.

Список используемой литературы

1. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В. Блази; пер. с нем. под ред. А.К. Соловьева. - М.: Техносфера, 2015. - 536 с.
2. Емелин, А. В. Адаптированный энергоаудит системы электроснабжения и электропотребления предприятий хранения зерна : специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Емелин Антон Валерьевич. – Краснодар, 2010. – 158 с. – EDN QETILL.
3. Емелин, А. В. Лабораторные работы по физике раздел теплота / А. В. Емелин, С. Н. Харченко. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – 43 с. – EDN SLEAHV.
4. Емелин, А. В. Электронагревательные установки в сельском хозяйстве / А. В. Емелин, С. Н. Харченко. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2023. – 106 с. – EDN DOLOFC.
5. Козлов, В.В. Теплотехнические качества ограждающих конструкций зданий: монография / В.В. Козлов. - М.: Изд-во АСВ, 2013. - 272 с.
6. Савенко, А. В. Аппаратное обеспечение энергоаудита системы энергоснабжения и электропотребления электрической сети 0,4 кВ сельскохозяйственного предприятия / А. В. Савенко, А. В. Емелин, А. С. Белых // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2008. – № S1. – С. 123-124. – EDN VLBADD.
- 7.