

ЗАНЯТИЕ 2

(2 часа)

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Виды теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционными называют материалы, применяемые в строительстве жилых и промышленных зданий, тепловых агрегатов и трубопроводов с целью уменьшить тепловые потери в окружающую среду. Теплоизоляционные материалы характеризуются пористым строением и, как следствие этого, малой плотностью (не более 600 кг/м³) и низкой теплопроводностью (не более 0,18 Вт/(м*°С)).

Использование теплоизоляционных материалов позволяет уменьшить толщину и массу стен и других ограждающих конструкций, снизить расход основных конструктивных материалов, уменьшить транспортные расходы и соответственно снизить стоимость строительства. Наряду с этим при сокращении потерь тепла отапливаемыми зданиями уменьшается расход топлива. Многие теплоизоляционные материалы вследствие высокой пористости обладают способностью поглощать звуки, что позволяет употреблять их также в качестве акустических материалов для борьбы с шумом.

Теплоизоляционные материалы классифицируют по виду основного сырья, форме и внешнему виду, структуре, плотности, жесткости и теплопроводности.

По форме и внешнему виду различают теплоизоляционные материалы штучные жесткие (плиты, скорлупы, сегменты, кирпичи, цилиндры) и гибкие (маты, шнуры, жгуты), рыхлые и сыпучие (вата, перлитовый песок, вермикулит).

По структуре теплоизоляционные материалы классифицируют на волокнистые (минераловатные, стекло - волокнистые), зернистые (перлитовые, вермикулитовые), ячеистые (изделия из ячеистых бетонов, пеностекло).

По плотности теплоизоляционные материалы делят на марки: 15, 25, 35, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600.

В зависимости от жесткости (относительной деформации) выделяют материалы мягкие (М) - минеральная и стеклянная вата, вата из каолинового и базальтового волокна, полужесткие (П) - плиты из шпательного стекловолокна на синтетическом связующем и др., жесткие (Ж) - плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем, повышенной жесткости (ПЖ), твердые (Т).

По теплопроводности теплоизоляционные материалы разделяются на классы: А - низкой теплопроводности до 0,06 Вт/(м*°С), Б - средней теплопроводности - от 0,06 до 0,115 Вт/(м*°С), В - повышенной теплопроводности - от 0,115 до 0,175 Вт/(м*°С).

По назначению теплоизоляционные материалы бывают теплоизоляционно-строительные (для утепления строительных конструкций) и теплоизоляционно-монтажные (для тепловой изоляции промышленного оборудования и трубопроводов).

Теплоизоляционные материалы должны быть биостойкими т. е. не подвергаться загниванию и порче насекомыми и грызунами, сухими, с малой гигроскопичностью так как при увлажнении их теплопроводность значительно повышается, химически стойкими, а также обладать тепло и огнестойкостью.

Теплоизоляционные материалы по виду основного сырья подразделяются на неорганические, изготавливаемые на основе различных видов минерального сырья (горных пород, шлаков, стекла, асбеста), органические, сырьем для производства которых служат природные органические материалы (торфяные, древесноволокнистые) и материалы из пластических масс.

Органические теплоизоляционные материалы в зависимости от природы исходного сырья можно условно разделить на два вида: материалы на основе природного органического сырья (древесина, отходы деревообработки, торф, однолетние растения, шерсть животных и т. д.), материалы на основе синтетических смол, так называемые теплоизоляционные пластмассы.

Теплоизоляционные материалы из органического сырья могут быть жесткими и гибкими. К жестким относят древесностружечные, древесноволокнистые, фибролитовые, арболитовые, камышитовые и торфяные, к гибким - строительный войлок и гофрированный картон. Эти теплоизоляционные материалы отличаются низкой водо- и биостойкостью.

Древесноволокнистые теплоизоляционные плиты получают из отходов древесины, а также из различных сельскохозяйственных отходов (солома, камыш, костра, стебли кукурузы и др.). Процесс изготовления плит состоит из следующих основных операций: дробление и размол древесного сырья, пропитка волокнистой массы связующим, формование, сушка и обрезка плит.

Древесноволокнистые плиты выпускают длиной 1200-2700, шириной 1200-1700 и толщиной 8-25 мм. По плотности их делят на изоляционные (150-250 кг/м³) и изоляционно-отделочные (250-350 кг/м³).

Теплопроводность изоляционных плит 0,047-0,07, а изоляционно-отделочных-0,07-0,08 Вт/(м·°С). Предел прочности плит при изгибе составляет 0,4-2 МПа. Древесноволокнистые плиты обладают высокими звукоизоляционными свойствами.

Изоляционные и изоляционно-отделочные плиты применяют для тепло- и звукоизоляции стен, потолков, полов, перегородок и перекрытий зданий, акустической изоляции концертных залов и театров (подвесные потолки и облицовка стен).

Арболит изготавливают из смеси цемента, органических заполнителей, химических добавок и воды. В качестве органических заполнителей используют дробленые отходы древесных пород, сечку камыша, костру конопли или льна и т. п.. Технология изготовления изделий из арболита проста и включает операции по подготовке органических заполнителей, например дробление отходов древесных пород, смешивание заполнителя с цементным раствором, укладку полученной смеси в формы и ее уплотнение, отверждение отформованных изделий.

Теплоизоляционные материалы из пластмасс. В последние годы создана довольно большая группа новых теплоизоляционных материалов из пластмасс. Сырьём для их изготовления служат термопластичные (полистирольные; поливинилхлоридные, пенополиуретановые) и терморезактивные (мочевина - формальдегидные) смолы, газообразующие и вспенивающие вещества, наполнители, пластификаторы, красители и др. В строительстве наибольшее распространение в качестве тепло- и звукоизоляционных материалов получили пластмассы пористо-ячеистой структуры. Образование в пластмассах ячеек или полостей, заполненных газами или воздухом, вызвано химическими, физическими или механическими процессами или их сочетанием.

В зависимости от структуры теплоизоляционные пластмассы могут быть разделены на две группы: пенопласты и поропласты. Пенопластами называют ячеистые пластмассы с малой плотностью и наличием несообщающихся между собой полостей или ячеек, заполненных газами или воздухом. Поропласты – пористые пластмассы, структура которых характеризуется сообщающимися между собой полостями. Наибольший интерес для современного индустриального строительства представляют пенополистирол, пенополивинилхлорид, пенополиуретан и мипора. Пенополистирол – материал в виде белой твердой пены с равномерной замкнутопористой структурой. Пенополистирол выпускают марки ПСБС в виде плит размером 1000x500x100 мм и плотностью 25-40 кг/м³. Этот материал имеет теплопроводность 0,05 Вт/(м·°С), максимальная температура его применения 70 °С. Плиты из пенополистирола применяют для утепления стыков крупнопанельных зданий, изоляции промышленных холодильников, а также в качестве звукоизолирующих прокладок.



Экструдированный пенополистирол – его получают путем смешивания гранул полистирола при повышенной температуре с последующим выдавливанием из экструдера и введением вспенивающего агента. В качестве вспенивающего агента использовались последовательно - жесткие фреоны, смеси жестких и мягких фреонов, мягкие фреоны и, наконец, безфреоновые системы на основе CO₂. Наряду с нулевой капиллярностью и ничтожным водопоглощением (менее 0,3 %) экструдированный пенополистирол обладает необычайно высокой прочностью на сжатие, а также стабильными теплоизоляционными характеристиками, значительно

превышающими средние значения большинства других изоляционных материалов (теплопроводность - 0,03 Вт/м·К). Он морозостоек и долговечен, химически устойчив и не подвержен гниению. Основными направлениями применения данного утеплителя являются: теплоизоляция фундаментов, теплоизоляция полов, теплоизоляция стен и кровель как жилых, так и общественных зданий, а также холодильных и морозильных установок, ледовых арен, рефрижераторного транспорта и изотермических фургонов.

Диапазон толщин - от 5 мм до 120 мм - позволяет удовлетворить спрос в различных отраслях промышленности



Пенополиуретан – это неплавкая термореактивная пластмасса с ярко выраженной ячеистой структурой. Только 3% от объема пенополиуретана занимает твердый материал, образующий каркас из ребер и стенок. Эта кристаллическая структура придает материалу механическую прочность. Остальные 97% объема пенополиуретана занимают полости и поры, заполненные газом фторхлорметаном с чрезвычайно низкой теплопроводностью, причем доля замкнутых пор в пенополиуретане достигает 90 – 95%. Пенополиуретан является одним из самых эффективных теплоизоляционных и экологически чистых материалов,

используемых в современном строительстве для стен, полов, крыш, перекрытий, фундаментов, трубопроводов, а также для холодильных установок. Очевидные преимущества напыляемой пенополиуретановой изоляции: надежная гидроизоляция; долговечность; высокая прочность; тепло- и морозостойкость в диапазоне температур от -180°C до $+180^{\circ}\text{C}$.

Сотопласты - теплоизоляционные материалы с ячейками, напоминающими форму пчелиных сот. Стенки ячеек могут быть выполнены из различных листовых материалов (крафт - бумаги, хлопчатобумажной ткани, стекло - ткани и др.), пропитанных синтетическими полимерами. Сотопласты изготовляют в виде плит длиной 1-1,5м, шириной 550 - 650 и толщиной 300 - 350 мм. Их плотность 30-100 кг/м³, теплопроводность 0,046-0,058 Вт/(м·°C). прочность при сжатии 0,3-4 МПа. Применяют сотопласты как наполнитель трехслойных панелей. Теплоизоляционные свойства сотопластов повышаются в результате заполнения сот крошкой мипоры.

Неорганические теплоизоляционные материалы. К неорганическим теплоизоляционным материалам относят минеральную вату, стеклянное волокно, пеностекло, вспученные перлит и вермикулит, асбестосодержащие теплоизоляционные изделия, ячеистые бетоны, и др.



Минеральная вата и изделия из нее. Минеральная вата волокнистый теплоизоляционный материал, получаемый из силикатных расплавов. Сырьем для ее производства служат горные породы (известняки, мергели, диориты и др.), отходы металлургической промышленности (доменные и топливные шлаки) и промышленности строительных материалов (бой глиняного и силикатного кирпича).

Производство минеральной ваты состоит из двух основных технологических процессов: получение силикатного расплава и превращение этого расплава в тончайшие волокна. Силикатный расплав образуется в вагранках шахтных плавильных печах, в которые загружают минеральное сырье и топливо (кокс). Расплав с температурой $1300-1400^{\circ}\text{C}$ непрерывно выпускают из нижней части печи.

Существует два способа превращения расплава в минеральное волокно: дутьевой и центробежный. Сущность дутьевого способа заключается в том, что на струю жидкого расплава, вытекающего из летки вагранки, воздействует струя водяного пара или сжатого газа. Центробежный способ основан на использовании центробежной силы для превращения струи расплава в тончайшие минеральные волокна толщиной 2-7 мкм и длиной 2-40 мм. Полученные волокна осаждаются в камере волокна осадения на движущуюся ленту транспортера. Минеральная вата это рыхлый материал, состоящий из тончайших переплетенных минеральных волокон и небольшого количества стекловидных включений (шариков, цилиндров и др.), так называемых корольков. Чем меньше в вате корольков, тем выше ее качество.

В зависимости от плотности минеральная вата подразделяется на марки 75, 100, 125 и 150. Она огнестойка, не гниет, малогигроскопична и имеет низкую теплопроводность 0,04 - 0,05 Вт (м·°C).

Минеральная вата хрупка, и при ее укладке образуется много пыли, поэтому вату гранулируют т.е. превращают в рыхлые комочки - гранулы. Их используют в качестве теплоизоляционной засыпки пустотелых стен и перекрытий. Сама минеральная вата является как бы полуфабрикатом, из которого выполняют разнообразные теплоизоляционные минераловатные изделия: войлок, маты, полужесткие и жесткие плиты, скорлупы, сегменты и др.

Размеры

Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм
1200	150/200	50-200

Стекловолоконная вата и изделия из нее.



Стекловолоконная вата материал, состоящий из беспорядочно расположенных стеклянных волокон, полученных из расплавленного сырья. Сырьем для производства стекловаты служит сырьевая шихта для варки стекла (кварцевый песок, кальцинированная сода и сульфат натрия) или стекольный бой. Производство стекловолоконной ваты и изделий из нее состоит из следующих технологических процессов: варка стекломассы в ваннах печей при 1300-1400°C, изготовление стекловолокна и формование изделий.

Стекловолокно из расплавленной массы получают способами вытягивания или дутьевым. Стекловолокно вытягивают штабиковым (подогревом стеклянных палочек до расплавления с последующим их вытягиванием в стекловолокно, наматываемое на вращающиеся барабаны) и фильерным (вытягиванием волокон из расплавленной стекломассы через небольшие отверстия-фильтры с последующей намоткой волокон на вращающиеся барабаны) способами. При дутьевом способе расплавленная стекломасса распыляется под действием струи сжатого воздуха или пара.

В зависимости от назначения вырабатывают текстильное и теплоизоляционное (штапельное) стекловолокно. Средний диаметр текстильного волокна 3-7 мкм, а теплоизоляционного 10-30 мкм.

Стекловолоконное волокно значительно большей длины, чем волокна минеральной ваты и отличается большими химической стойкостью и прочностью. Плотность стекловолоконной ваты 75-125 кг/м³, теплопроводность 0,04-0,052 Вт/(м*°C), предельная температура применения стекловолоконной ваты 450 °C. Из стекловолокна выполняют маты, плиты, полосы и другие изделия, в том числе тканые.

Размеры

Ширина, мм	600
------------	-----

Пеностекло - теплоизоляционный материал ячеистой структуры. Сырьем для производства изделий из пеностекла (плит, блоков) служит смесь тонкоизмельченного стеклянного боя с газообразователем (молотым известняком). Сырьевую смесь засыпают в формы и нагревают в печах до 900 °C, при этом происходит плавление частиц и разложение газообразователя. Выделяющиеся газы вспучивают стекломассу, которая при охлаждении превращается в прочный материал ячеистой структуры

Пеностекло обладает рядом ценных свойств, выгодно отличающих его от многих других теплоизоляционных материалов: пористость пеностекла 80-95 %, размер пор 0,1-3 мм, плотность 200-600 кг/м³, теплопроводность 0,09-0,14 Вт/(м*°C), предел прочности при сжатии пеностекла 2-6 МПа. Кроме того, пеностекло характеризуется водостойкостью, морозостойкостью, несгораемостью, хорошим звукопоглощением, его легко обрабатывать режущим инструментом.

Пеностекло в виде плит длиной 500, шириной 400 и толщиной 70-140 мм используют в строительстве для утепления стен, перекрытий, кровель и других частей зданий, а в виде полуцилиндров, скорлуп и сегментов - для изоляции тепловых агрегатов и теплосетей, где температура не превышает 300 °C. Кроме того, пеностекло служит звукопоглощающим и одновременно отделочным материалом для аудиторий, кинотеатров и концертных залов.

Асбестосодержащие материалы и изделия. К материалам и изделиям из асбестового волокна без добавок или с добавкой связующих веществ относят асбестовые бумагу, шнур, ткань, плиты и др. Асбест может быть также частью композиций, из которых изготавливают разнообразные теплоизоляционные материалы (совелит и др). В рассматриваемых материалах и изделиях использованы ценные свойства асбеста: температуростойкость, высокая прочность, волокнистость и др.

Алюминиевая фольга (альфоль) – новый теплоизоляционный материал, представляющий собой ленту гофрированной бумаги с наклеенной на гребне гофров алюминиевой фольгой. Данный вид теплоизоляционного материала в отличие от любого пористого материала сочетает низкую теплопроводность воздуха, заключенного между листами алюминиевой фольги, с высокой отражательной способностью самой поверхности алюминиевой фольги. Алюминиевую фольгу для целей теплоизоляции выпускают в рулонах шириной до 100, толщиной 0,005- 0,03 мм.

Практика использования алюминиевой фольги в теплоизоляции показала, что оптимальная толщина воздушной прослойки между слоями фольги должна быть 8- 10 мм, а количество слоев должно быть не менее трех. Плотность такой слоевой конструкции из алюминиевой (фольги 6-9 кг/м³, теплопроводность - 0,03 - 0,08 Вт/(м* С).

Алюминиевую фольгу употребляют в качестве отражательной изоляции в теплоизоляционных слоистых конструкциях зданий и сооружений, а также для теплоизоляции поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов при температуре 300 °С [6].

Расчет оптимальной толщины теплоизоляционного материала

Задача.

Записать себе виды и характеристики теплоизоляционных материалов.

Произвести расчет **оптимальной толщины теплоизолятора** для бетонной стены здания по каждому теплоизоляционному материалу, сравнить их, произвести расчет экономии тепловой энергии от применения теплоизолятора.

Параметры здания: длина 20м, высота 7м

Расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха соответственно: 23°С и -32°С.

Решение:

В данной работе мы будем утеплять бетонную стену с целью уменьшения теплопотерь в здании. В качестве теплоизоляционного материала будем рассматривать **пенополиуретан, минеральную вату, стекловату и экструдированный пенополистирол**. Рассчитав оптимальную толщину каждого теплоизоляционного материала, и сравнив их по цене, выбираем наиболее экономичный материал. На рис.1 приводим схему нашей многослойной стенки

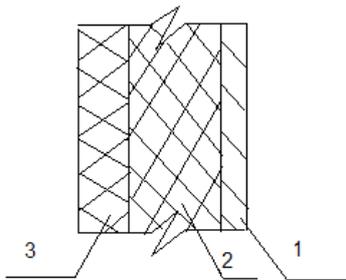


Рис. 1. Схема многослойной стенки.

Таблица 1. Слои ограждающей конструкции

№ слоя	Материал	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Толщина δ , м
1	Штукатурка (цементно-песчаный раствор)	1800	0,02
2	Керамзитопенобетонная плита	1900	0,19
3	Теплоизоляционный материал	x	y

Основным требованием к выбору толщины слоя утеплителя в ограждении с известным составом является выполнение условия: приведенное сопротивление теплопередаче R_0 должно быть не ниже требуемого сопротивления теплопередаче ограждения R_{req} . Однако R_0 зависит не только от характеристики материалов и толщины слоев, составляющих ограждение, но и от наличия внутренних связей конструкции, являющихся теплопроводными включениями, а также от того, как и какие именно другие ограждения примыкают к расчетному. Для этого:

1. Находим требуемое сопротивление теплопередаче наружного ограждения R_{req} , м²·°С/Вт. При расчете требуемого сопротивления теплопередаче ограждений R_{req} , м²·°С/Вт, исходим из поддержания в заданных пределах разности температур внутренней поверхности ограждения и внутреннего воздуха в расчетный зимний период:

$$R_{reg} = n \frac{t_B - t_C}{\Delta t^H \alpha_B} \quad (1)$$

где Δt^H - нормируемый перепад температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждения

примем равным $7 \text{ }^\circ\text{C}$; α_b - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций [для стен, полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты h ребер к расстоянию, а между гранями соседних ребер $h/a = 0,3$ принимается равным $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, а для потолков с выступающими ребрами при $h/a > 0,3$ - $7,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$], примем $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$;

n - коэффициент положения ограждения относительно наружного воздуха, который определяется по формуле:

$$n = \frac{t_B - t_C}{t_B - t_H} \quad (2)$$

t_H - расчетная температура наружного воздуха в зимний период, $^\circ\text{C}$; t_B - температура внутреннего воздуха, $^\circ\text{C}$; t_C - расчетную температуру воздуха на теплом чердаке, в подвале, остекленной лоджии или на балконе, $^\circ\text{C}$. В нашем случае такого помещения нет, поэтому $t_C = t_H$.

Найдем коэффициент n по формуле 2:

$$n = \frac{23 - (-32)}{23 - (-32)} = 1$$

Сопротивление теплопередаче наружного ограждения, рассчитываемая по формуле 1:

$$R_{\text{req}} = 1 \frac{23 - (-32)}{7 \cdot 8,7} = 0,903 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

2. Рассчитываем коэффициент теплотехнической однородности. Для различных ограждений величина этого коэффициента в зависимости от их конструкции колеблется в пределах $0,65-0,98$. Коэффициент теплотехнической однородности r может быть рассчитан как произведение коэффициентов, оценивающих различные факторы, возмущающие однородное температурное поле:

$$r = r_1 r_2, \quad (3)$$

где r_1, r_2 - коэффициенты соответственно оценки внутренних креплений в ограждении и примыкания других ограждений к расчетному.

Для двухслойных стен с конструктивным слоем плотностью от 600 до $2500 \text{ кг}/\text{м}^3$ и эффективным утеплителем на прямых металлических связях диаметром не более 3 мм , закрепленных на дюбелях, $r_1 = 0,95-0,98$. Присутствие вытяжной вентиляции оценивается коэффициентом $r_2 = 0,90-0,95$.

В нашем случае коэффициент теплотехнической однородности, определяемый по формуле 3, составит:

$$r = 0,965 \cdot 0,925 = 0,893.$$

3. Вычисляем требуемое условное сопротивление теплопередаче $R_0^{\text{усл.тр}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$:

$$R_0^{\text{усл.тр}} = \frac{R_{\text{req}}}{r} \quad (4)$$

$$R_0^{\text{усл.тр}} = \frac{0,903}{0,893} = 1,01 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

4. Составляем таблицу теплотехнических показателей строительных материалов, где в качестве теплоизоляционного материала берем – **пенополиуретан**.

Таблица 2. Теплотехнические показатели строительных материалов

Материал	Плотность ρ_0 , $\text{кг}/\text{м}^3$	Толщина δ , м	Удельная теплоемкость c_0 , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$	Коэффициент теплопроводности λ_A , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$
Штукатурка (цементно-песчаный раствор)	1800	0,02	0,84	0,66

Керамзитопенобетонная плита	1900	0,19	0,84	0,75
Пенополиуретан	80	?	1,47	0,025

5. Вычисляем требуемое сопротивление теплопередаче утеплителя $R_{ут}^{тр}$, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$:

$$R_{ут}^{тр} = R_0^{усл.тр} - (R_B + \Sigma R_T + R_H) \quad (5)$$

где ΣR_T - сумма термических сопротивлений всех слоев ограждения без слоя утеплителя, определенных с учетом коэффициентов теплопроводности материалов, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$. R_B , R_H - величины, обратные коэффициентам теплоотдачи, их принято называть сопротивлениями теплообмену на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$. Определяются по формуле:

$$R_B = \frac{1}{\alpha_B}; R_H = \frac{1}{\alpha_H} \quad (6)$$

где α_B , α_H - коэффициенты теплоотдачи наружного и внутреннего ограждения соответственно, $Вт / (м^2 \cdot ^\circ C)$.

Таблица 3. Значения коэффициента теплоотдачи наружной поверхности ограждающих конструкций для зимних условий

Ограждающие конструкции	α_H , Вт/(м ² · °С)
Наружные стены, покрытия, перекрытия над проездами и холодными подпольями без ограждающих стенок в Северной строительной-климатической зоне	23
Перекрытия над холодными подвалами, сообщающимися с наружным воздухом; перекрытия над холодными подпольями с ограждающими стенками и холодными этажами в Северной строительной-климатической зоне	17
Перекрытия чердачные и над неотапливаемыми подвалами со световыми проемами в стенах	12
Перекрытия над неотапливаемыми подвалами без световых проемов в стенах, расположенных выше уровня земли, и над неотапливаемыми техническими подпольями, расположенными ниже уровня земли	6

Определим требуемое сопротивление теплопередаче утеплителя по формулу 5:

$$R_0^{усл.тр} = 1,01 - \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,66} + \frac{0,19}{0,75} + \frac{1}{23} \right) = 0,532 \text{ м}^2 \cdot ^\circ C / Вт.$$

6. Находим расчетную толщину утеплителя $\delta_{ут}$ м:

$$\delta_{ут} = R_{ут}^{тр} \lambda_{ут} \quad (7)$$

где $\lambda_{ут}$ - коэффициент теплопроводности материала утеплителя, $Вт / (м \cdot ^\circ C)$.

$$\delta_{ут} = 0,532 \cdot 0,025 = 0,014 \text{ м.}$$

7. Принимаем конструктивное значение толщины утеплителя $\delta_{\text{ут}}$. Дело в том, что некоторые утеплители выпускаются с определенной номенклатурой толщины, например, с шагом, равным 1 см. Фактическая толщина утеплителя равна $\delta_{\text{ут}}^{\text{ф}} = 0,02 \text{ м}$.

8. Определяем фактическое условное сопротивление теплопередаче ограждения $R_0^{\text{усл}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$:

$$R_0^{\text{усл}} = R_{\text{в}} + \sum R_{\text{тi}} + R_{\text{н}} \quad (8)$$

где $\sum R_{\text{тi}}$ - сумма термических сопротивлений всех слоев ограждения, в том числе и слоя утеплителя, принятой конструктивной толщины, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

$$R_0^{\text{усл}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,75} + \frac{0,19}{0,66} + \frac{0,02}{0,025} + \frac{1}{23} = 1,273 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

9. Определяем фактическое приведенное сопротивление теплопередаче ограждения R_0 , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$:

$$R_0 = R_0^{\text{усл}} \cdot r \quad (9)$$

$$R_0 = 1,273 \cdot 0,893 = 1,137 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

10. Проверяем выполнение условия

$$R_0 \geq R_{\text{req}} \quad (10)$$

$1,137 \geq 0,903$, условие выполняется, следовательно фактическое приведенное сопротивление теплопередаче не меньше требуемого.

11. Таким образом, коэффициент теплопередачи стены:

$$K_{\text{нс}} = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{1,137} = 0,88 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$$

Для сравнения, аналогично рассчитаем оптимальную толщину следующих теплоизоляционных материалов: минеральная вата, стекловата и экструдированный пенополистирол.

Таблица 4. Сравнительная таблица традиционных теплоизоляционных материалов

Теплоизолятор	Стоимость изолятора (руб/м ²)	Коэфф. теплопроводности (Вт/м*К)	Оптимальная толщина теплоизолятора, м	Срок эксплуатации (лет)	Диапазон рабочих температур
ППУ жесткий	300	0,019-0,025	0,02	30	-180.. +180
Минеральная вата	664	0,052-0,058		5	-40..+120
Стекловата	350	0,045-0,052		20	-60.. +180
Экструдированный пенополистирол	320	0,025-0,028		25	-50.. +75

Заполнив таблицу, мы можем выбрать наиболее экономичный вариант, как по цене, так и по другим параметрам. Таким образом, для теплоизоляции стен мы можем использовать (сделать выводы на основании 4 столбца таблицы 4).

Допустим, для теплоизоляции стен мы можем использовать ППУ жесткий.

Рассчитаем основные потери теплоты через стены с использованием и без использования теплоизолятора:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{F}{R}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})n \quad (11)$$

где F площадь ограждающей конструкции, м^2 ; n - коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждения по отношению к наружному воздуху.

Рассчитаем основные потери теплоты через стены с использованием и без использования ППУ жесткого:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{F}{R}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})n \quad (11)$$

где F площадь ограждающей конструкции, м^2 ; n - коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждения по отношению к наружному воздуху.

1) В первом случае рассчитаем $Q_{\text{пот}}$ без использования теплоизолятора по формуле 2,11:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{0,5(2 \cdot 140 + 2 \cdot 75)}{\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,66} + \frac{0,19}{0,75} + \frac{1}{23}} (23 - (-32)) \cdot 1 = 26753,4 \text{ Вт}$$

2) Во втором случае рассчитываем $Q_{\text{пот}}$ с использованием теплоизолятора:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{0,5(2 \cdot 140 + 2 \cdot 75)}{\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,66} + \frac{0,19}{0,75} + \frac{0,02}{0,025} + \frac{1}{23}} (23 - (-32)) \cdot 1 = 9520,9 \text{ Вт}$$

Экономия тепла составит: $\Delta Q = 26753,4 - 9520,9 = 17232,5 \text{ Вт}$.

Таблица 4. Сравнительная таблица традиционных теплоизоляционных материалов

Теплоизолятор	Стоимость изолятора (руб/м ²)	Коэфф. теплопроводности (Вт/м*К)	Оптимальная толщина теплоизолятора, м	Срок эксплуатации (лет)	Диапазон рабочих температур
ППУ жесткий	300	0,019-0,025	0,02	30	-180.. +180
Минеральная вата	664	0,036-0,042	0,04	5	-40..+120
Стекловата	350	0,045-0,052	0,035	20	-60.. +180
Экструдированный пенополистирол	320	0,025-0,028	0,02	25	-50.. +75

Заполнив таблицу, мы можем выбрать наиболее экономичный вариант, как по цене, так и по другим параметрам. Таким образом, для теплоизоляции стен мы можем использовать ППУ жесткий, а также экструдированный пенополистирол. Он не намного дороже, но как и ППУ обладает замечательными качествами теплоизолятора, и отлично подходит для влажной среды.

Рассчитаем основные потери теплоты через стены с использованием и без использования ППУ жесткого:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{F}{R} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) n \quad (11)$$

где F площадь ограждающей конструкции, м²; n - коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждения по отношению к наружному воздуху.

3) В первом случае рассчитаем $Q_{\text{пот}}$ без использования теплоизолятора по формуле 11:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{20 \cdot 7}{\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,66} + \frac{0,19}{0,75} + \frac{1}{23}} (23 - (-32)) \cdot 1 = 17763 \text{ Вт}$$

4) Во втором случае рассчитываем $Q_{\text{пот}}$ с использованием теплоизолятора:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{20 \cdot 7}{\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,66} + \frac{0,19}{0,75} + \frac{0,02}{0,025} + \frac{1}{23}} (23 - (-32)) \cdot 1 = 6260 \text{ Вт}$$

Экономия тепла составит: $\Delta Q = 17763 - 6260 = 11502 \text{ Вт}$.