

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства  
Кафедра «Санитарно-технических системы»

Утверждено на заседании кафедры  
«Санитарно-технических систем»  
«20» января 2023г., протокол №5

Заведующий кафедрой



Р.А. Ковалев

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**  
**«Энергоэффективная тепловая защита зданий»**

**основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы магистратуры**

по направлению подготовки  
**08.04.01 – "Строительство"**

с направленностью (профилем)  
**"Теплогазоснабжение и вентиляция"**

Форма(ы) обучения: *очная, заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 080401-05-23

Тула 2023 год

**Разработчик методических указаний**

Вялкова Н.С. доцент, к.т.н.

*(Ф.И.О., должность, ученая степень, ученое звание)*



\_\_\_\_\_  
*(подпись)*

## Содержание

2

	Введение	4
1	Современное состояние вопроса применяемых мероприятий по снижению потребления тепловой энергии путем совершенствования ограждающих конструкций	5
1.1	Нормирование тепловой защиты зданий	5
1.2	Современные низкотеплопроводные теплоизоляционные материалы	15
2	Расчет теплового режима наружных ограждений	16
2.1	Расчет и построение стационарного температурного поля в наружном ограждении для зимних условий	16
2.2	Расчет температуры внутренней поверхности наружного угла	19
3	Расчет влажностного режима наружной стены	19
3.1	Проверка на отсутствие конденсации водяного пара на внутренней поверхности глади наружной стены и наружного угла	19
3.2	Определение сопротивления паропроницанию наружной стены и построение зоны возможной конденсации водяного пара в ее толще	21
	Выводы и рекомендации	26
	Литература	26

## ВВЕДЕНИЕ

2

Приоритетной задачей энергетической стратегии России является повышение эффективности использования топливно - энергетических ресурсов (ТЭР) и вывод экономики страны на энергосберегающий путь развития.

Наиболее эффективный путь экономии ТЭР ресурсов в капитальном строительстве - снижение теплопотерь через ограждающие конструкции зданий за счет повышения уровня их теплозащиты. С повышением нормативных требований гражданское строительство в последние годы ориентируется на возведение зданий с использованием в многослойных стенах эффективных теплоизоляционных материалов с коэффициентом теплопроводности до 0,06 Вт/(м<sup>2</sup>°К). Это обусловлено стремлением проектировщиков получить необходимое нормируемое сопротивление теплопередаче  $R_{\text{req}}$  ограждающих конструкций, по значению в 3-4 раза превышающее требования старых норм. Большинство применяемых в настоящее время при возведении стен строительных материалов могут обеспечить требуемое  $R_{\text{req}}$  и в однослойных конструкциях, но толщина стен при этом может выходить за разумные пределы. Так, для обеспечения требуемого  $R$  в средней полосе России толщина стены из силикатного кирпича должна быть более 3 м.

Но, наличие в ограждающих конструкциях различных материальных слоев с отличающимися физико-техническими свойствами (плотностью, теплоемкостью, теплопроводностью, паропроницаемостью, сорбционной способностью), по-разному реагирующих на колебания температуры и влажности окружающей среды, существенно затрудняет прогнозирование теплотехнического состояния ограждений в эксплуатационных условиях, а использование новых, еще недостаточно исследованных теплоизоляционных материалов, может привести к непредсказуемым последствиям.

Требуется новый подход к проектированию тепловой защиты, многослойных ограждающих конструкций зданий, основанный на многовариантных расчетах их тепловлажностного состояния и оценке их теплотехнической эффективности в эксплуатационных условиях.

# 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

## 1.1 НОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

Основные требования нормирования теплозащиты зданий . сформулированы в нормативных документах: СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», изменение №1 от 15.06.2019 г. к СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», также в территориальных нормах районов строительства.

В СП 50.13330.2012 и изменении №1 от 15.06.2019 г. к СП 50.13330.2012 для зданий установлены три нормируемых показателя тепловой защиты:

- приведенное сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающих конструкций здания; в том числе и наружных стен;
- санитарно-гигиенический показатель, определяющий перепад между температурой внутреннего воздуха и температурами поверхностей ограждающих конструкций, в том числе и стен;
- удельный расход тепловой энергии на отопление здания, позволяющий варьировать величинами теплозащитных свойств ограждающих конструкций" зданий, в том числе и стен.

### *Требуемое сопротивление теплопередаче*

При выборе оптимальных решений по теплозащитным свойствам наружных ограждений необходимо руководствоваться требованиями, которые влияют на технические решения в области строительства в соответствии с государственными приоритетами. Это санитарно-гигиенические, экономические требования или задачи энергосбережения. В соответствии с этим определяются нормативные значения общего сопротивления теплопередаче.

Минимальное сопротивление теплопередаче определяется исходя из следующих санитарно-гигиенических требований:

- исключение возможности образования конденсата на внутренней поверхности наружных ограждений;
- ограничение количества тепла, отдаваемого с поверхности тела человека путем излучения;
- ограничение локальной асимметрии теплоотдачи.

Рассмотрим первое требование. Известно, что в состав воздуха входят водяные пары, количество которых определяет его влажность. Для каждого состояния воздуха, которое характеризуется температурой, влажностью и барометрическим давлением, существует температура, при которой воздух становится насыщенным, т. е. приобретает относительную влажность  $\varphi = 100 \%$ . Эта температура называется температурой точки росы. Если температура внутренней поверхности ограждения ниже температуры точки росы, то на внутренней поверхности образуется конденсат. Поэтому при проектировании ограждений необходимо, чтобы температура внутренней поверхности ограждения была выше температуры точки росы при заданной температуре и относительной влажности воздуха. Таким образом, выполнение данного требования сводится к ограничению минимальной температуры внутренней поверхности наружного ограждения.

Второе требование касается самочувствия человека. Известно, что тепло передается с поверхности тела человека конвекцией, излучением и при испарении с поверхности кожи (рис. 1.1). Уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_o = Q_k + Q_l + Q_{\text{исп}},$$

где  $Q_o$  — общая теплоотдача человека в окружающую среду;  $Q_k$ ,  $Q_l$ ,  $Q_{\text{исп}}$  — тепло, отдаваемое человеком за счет конвекции, излучения и испарения соответственно.

На рис. 1.1 приведена доля этих составляющих при нормальных условиях. При этом величина лучистой составляющей зависит от температуры

тепловоспринимающей поверхности, т. е. от температуры внутренней поверхности наружного ограждения в наибольшей степени.

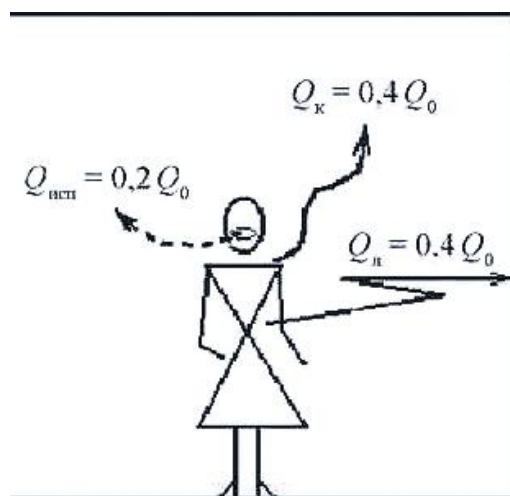


Рис. 1.1. Схема теплообмена человека с окружающей средой

Асимметрия теплоотдачи заключается в том, что температура поверхностей, окружающих человека, находящегося в помещении, различна. Следовательно, будет отличаться и количество тепла, отдаваемого излучением.

Анализируя третье требование, касающееся ограничения асимметрии теплоотдачи излучением с поверхности тела человека, можно сделать аналогичный вывод о необходимости нормирования температуры внутренней поверхности.

Это требование было сформулировано недавно с учетом данных гигиенических исследований.

Итак, для удовлетворения перечисленных требований необходимо ограничить температуру на внутренней поверхности наружного ограждения. Но эта температура, в свою очередь, зависит от температуры внутреннего воздуха в помещении. Поэтому принято ограничивать не саму температуру на внутренней поверхности наружного ограждения, а разность между температурой внутреннего воздуха и температурой на внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций.

Эту разность называют нормируемым температурным перепадом  $\Delta t^H = t_B - \tau_B$ . На ограничении этого температурного перепада и построено нормирование теплозащиты, принятое в строительной теплотехнике.

В условиях стационарной теплопередачи тепловой поток не изменяется во времени по величине и направлению, т. е.  $q = \text{idem}$ :

$$q = \frac{t_B - t_H}{R_O} = \frac{t_B - \tau_B}{R_B} = \dots = \frac{\tau_n - \tau_H}{R_n} = \frac{\tau_H - t_H}{R_H}. \quad (1.1)$$

Формула для определения требуемого сопротивления теплопередачи  $R_O^{\text{тр}}$

$$R_O^{\text{тр}} = \frac{R_B(t_B - t_H)n}{\Delta t^H}. \quad (1.2)$$

Значения нормируемого температурного перепада  $\Delta t^H = t_B - \tau_B$  зависят от назначения зданий (жилые, общественные, производственные) и вида наружных ограждений (наружные стены, чердачные перекрытия, перекрытия над подвалами).

Для поверхностей, выходящих в неотапливаемое помещение, в формулу вводится коэффициент уменьшения расчетной разности температур  $n$ . Значения этого коэффициента приводятся в зависимости от вида наружного ограждения.

Таким образом, величина требуемого сопротивления теплопередаче зависит от назначения здания и вида наружного ограждения, а также от географического местоположения района строительства, в соответствии с которым принимается температура наружного воздуха  $t_H$ . В качестве расчетной температуры наружного воздуха берется средняя температура холодной пятидневки января за последние 50 зим. Назначение здания учитывается при выборе температуры внутреннего воздуха  $t_B$ .

Полученное значение сопротивления теплопередаче не всегда является достаточным для выполнения других требований к теплозащите и может



не соответствовать задачам экономии энергоресурсов или снижения экономических затрат. Согласно действующим нормативам решение по теплозащите должно приниматься из условий энергосбережения. Этому условию соответствует сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения.

### *Сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения*

Чем больше уровень теплозащиты, тем меньше требуется энергоресурсов для поддержания необходимого теплового режима в помещении. В то же время экономия от снижения энергопотребления зависит от климатических условий района строительства (чем суровее климат, тем эффективнее теплозащита, тем больше экономия тепла). Суровость климата принято оценивать показателем «градусосутки отопительного периода». Значение этого показателя рассчитывается по формуле

$$B = (t_{\text{в}} - t_{\text{оп}})Z_{\text{оп}}, \quad (1.3)$$

где  $B$  — градусосутки отопительного периода, град. • сут.;  $t_{\text{в}}$  — расчетная температура внутреннего воздуха, °C;  $t_{\text{оп}}$  — средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °C;  $Z_{\text{оп}}$  — продолжительность отопительного периода, сут.

Отметим, что отопительный период — это период со среднесуточными значениями температуры наружного воздуха ниже или равной +8 °C. Данные о параметрах отопительного периода зависят от географического местоположения района строительства и принимаются по СП «Строительная климатология».

Значения показателя  $B$  для территории России изменяются в широких пределах: от 1000 градусосуток для Сочи до 12 000 — для районов Республики Саха — Якутия. Чем больше величина  $B$ , тем больше затраты на отопление и тем больший эффект дает улучшение теплозащиты. Поэтому чем больше значение показателя  $B$ , тем больше рекомендуемые значения сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения  $R_0^{\text{ЭН}}$ .

Значения сопротивлений теплопередаче  $R_0^{\text{ЭН}}$  были рассчитаны исходя из стратегического направления по снижению энергопотребления на перспективу. В соответствии с прогнозом изменения энергетического баланса России предусматривалось 20 %-е снижение удельного энергопотребления каждые пять лет. Нормы сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения были рассчитаны исходя из стратегического направления по снижению энергопотребления на перспективу. В соответствии с прогнозом изменения энергетического баланса России предусматривалось 20 %-е снижение удельного энергопотребления каждые пять лет. Нормы сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения  $R_0^{\text{ЭН}}$  были введены в 1995 г. на период до 2000 г. и затем с 2000 до 2005 г., но далее не менялись. Эти данные приведены в СП для зданий разного назначения в зависимости от величины показателя  $B$ , назначения здания и вида наружного ограждения.

Согласно действующим нормативам по назначению здания подразделяются на следующие группы:

- жилые, детские, лечебные;
- общественные;
- производственные.

Виды наружных ограждающих конструкций по СП: наружные стены; покрытия и чердачные перекрытия; перекрытия над проездами, подвалами и подпольями; зенитные фонари.

#### *Сопротивление теплопередаче из экономических условий*

В инженерной практике принято оценивать основные решения по экономическим условиям: оптимальному варианту должны соответствовать минимальные затраты финансовых средств. Рассмотрим этот подход применительно к задаче проектирования теплозащиты.

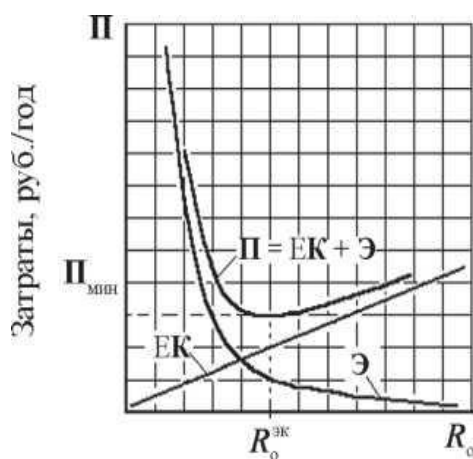
Годовые затраты на поддержание заданных параметров воздушной среды (приведенные затраты) в помещениях складываются из затрат на уст-

ройство теплозащиты наружных ограждений и эксплуатационных затрат (затрат на отопление):

$$\Pi = EK + \mathcal{E}, \quad (1.4)$$

где  $\Pi$  — приведенные затраты на теплозащиту, руб./год;  $E$  — коэффициент эффективности капитальных вложений или процентная ставка кредита, 1/год;  $K$  — капитальные затраты, руб.;  $\mathcal{E}$  — затраты на отопление, руб./год.

При увеличении общего сопротивления теплопередаче затраты на устройство теплозащиты наружных ограждений увеличиваются, а затраты на отопление уменьшаются. Сумма этих затрат имеет следующую тенденцию: при увеличении сопротивления теплопередаче суммарные затраты снижаются, а затем увеличиваются (рис. 1.2).



Сопротивление теплопередаче,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К/Вт}$

Рис. 3.2. Зависимость приведенных затрат от сопротивления теплопередаче

Как видно, график изменения суммарных затрат имеет минимум, которому соответствует оптимальное значение сопротивления теплопередаче из экономических условий  $R_0^{\text{ЭК}}$ . Решение можно получить графическим путем, задавая разные значения  $R_0$  и определяя  $K$ ,  $\mathcal{E}$  и  $\Pi$ .

Можно получить и аналитическое решение, имея в виду, что производная данной функции равна нулю в точке минимума. Такое решение было

получено В. Н. Богословским, который вывел формулу для расчета сопротивления теплопередаче из экономических условий :

$$R_o^{\text{эк}} = \sqrt{\frac{((t_{\text{в}} - t_{\text{оп}}) Z_{\text{оп}} C_{\text{т}})}{\lambda_{\text{ут}} C_{\text{ут}} E}} . \quad (1.5)$$

Здесь  $Z_{\text{оп}}$  — продолжительность отопительного периода, сут;  $c_{\text{т}}$  — стоимость единицы тепла, руб./Дж;  $\lambda_{\text{ут}}$ , — коэффициент теплопроводности материала утепляющего слоя, Вт/(м • °С);  $C_{\text{ут}}$  — стоимость утеплителя, руб./м<sup>3</sup>.

К сожалению, в последние годы в связи с изменением условий ценообразования экономический подход к выбору уровня теплозащиты применяется не всегда, а в действующих нормативных документах основное внимание уделено выполнению условий энергосбережения.

Анализ технических решений и оценка экономических тенденций развития энергетики, выполненный В. Г. Гагариным , показал, что дальнейшее повышение уровня теплозащиты зданий не является экономически целесообразным как по инвестиционной привлекательности, так и по эффективности капитальных вложений.

Опыт проектирования свидетельствует, что санитарно-гигиенические требования могут быть приоритетными и возможен возврат к нормированию по допустимому температурному перепаду. В работе [11] отмечается, что для выбора энергоэффективных решений необходимо учитывать экономические показатели (эксплуатационные расходы, окупаемость), а также энергетический баланс инженерных систем.

Был выполнен анализ изменения основных параметров, входящих в формулу (1.5). Использовались данные о тарифах региональных энергетических компаний и прайс-листы фирм — производителей теплоизоляционных материалов. Было установлено, что стоимость тепловой энергии значительно различается по регионам России и имеет устойчивую тенденцию роста.

В то же время стоимость современных типов утеплителей имеет значения в интервале  $c_{yt} = 2300-3300$  руб./м<sup>3</sup>. Коэффициенты теплопроводности большинства утеплителей составляют  $\lambda_{yt} = 0,034-0,044$  Вт/(м • °С), а различие по регионам России несущественно.

В табл. 1.1 представлены значения сопротивлений теплопередаче  $R_o^{эк}$  наружных стен и покрытий жилых зданий, рассчитанные по экономическим условиям по формуле (1.5) для основных регионов России, приведены значения сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения  $R_o^{эн}$ , принятые по СП в зависимости от показателя В. Установлено, что зависимость сопротивлений теплопередаче  $R_o^{эк}$  и  $R_o^{эн}$  и от показателя суровости климата В, практически одинакова.

Таблица 1.1 - Сопротивления теплопередаче наружных стен и покрытий жилых зданий  $R_o^{эн}$  по СП и по расчету  $R_o^{эк}$

Округ	Показатель В, град. • сут	Стоимость тепловой энергии, руб./Гкал	Сопротивление теплопередаче, м <sup>2</sup> •°С/Вт		
			$R_o^{эк}$	$R_o^{эн}$	
				стен	покрытий
Северо-	256	84	1,87	2,3	3,48
Южный	354	12	2,66	2,64	3,97
Северо-	481	69	2,32	3,13	4,61
Москва	494	14	3,40	3,18	4,67
Центральный	501	12	3,12	3,21	4,71
Приволжский	559	16	3,90	3,44	5,00
Уральский	644	91	3,09	3,73	5,42
Дальневосточ-	654	14	3,90	3,76	5,47
Сибирский	697	94	3,27	3,89	5,69

Данные табл. 1.1 показывают, что в настоящее время значения экономически целесообразного сопротивления теплопередаче наружных стен  $R_o^{эк}$  для большинства регионов России близки к рекомендуемым СП сопротивлениям теплопередаче по условиям энергосбережения  $R_o^{эн}$ . Однако для покрытий зданий значения  $R_o^{эн}$  сопротивлений теплопередаче значительно превышают экономически целесообразные  $R_o^{эк}$ .

Определение нормативного значения сопротивления теплопередаче расчетом позволяет определять уровень теплозащиты зданий с учетом региональных условий и формирования цен на тепловую энергию и теплоизоляционные материалы. При этом основными показателями нормирования являются стоимость тепловой энергии и теплоизоляционных материалов, а также климатологические данные района строительства.

Установлено, что нормативные значения сопротивлений теплопередаче, приведенные в СП, являются экономически обоснованными и не требуют пересмотра в сторону увеличения.

#### *Расчетное сопротивление теплопередаче*

В результате расчетов мы получаем минимальное сопротивление теплопередаче  $R_0^{\text{тр}}$ , сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения  $R_0^{\text{эн}}$  и сопротивление теплопередаче из экономических условий  $R_0^{\text{эк}}$ .

Следует обратить внимание на то, что строительные нормы допускают определение уровня теплозащиты по величине сопротивления теплопередаче в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями для объектов с избыточными тепловыделениями, а также для реконструируемых зданий.

В остальных случаях за расчетное значение сопротивления теплопередаче  $R_0^p$  принимается большее из полученных значений  $R_0^{\text{тр}}$  и  $R_0^{\text{эн}}$

Тогда из приведенного ниже уравнения можно определить термическое сопротивление  $R_{i_{\text{ут}}}$  и толщину утепляющего слоя:

$$R_0^p = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_1 + \dots + R_{i_{\text{ут}}} + \dots + R_n + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (1.6)$$

где  $R_1, \dots, R_{i_{\text{ут}}}, \dots, R_n$  — термические сопротивления материальных слоев,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;  $\alpha_{\text{в}}$  и  $\alpha_{\text{н}}$  — коэффициенты тепловосприятия и теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $i$  — номер слоя.

Входящее в это уравнение сопротивление теплопередаче теплоизоляционного слоя  $R_{ут}$  определяется как

$$R_{ут} = \frac{\delta_{iут}}{\lambda_{iут}} \quad (1.7)$$

откуда определяется значение толщины утепляющего слоя

$$\delta_{ут} = \frac{R_{ут}}{\lambda_{iут}} \quad (1.8)$$

### *Требования строительных норм*

Теплозащитная оболочка здания должна отвечать следующим нормативным требованиям:

1 - приведенные сопротивления теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должны быть не менее нормируемых значений (поэлементные требования);

2 - удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (комплексное требование);

3 - температура на внутренних поверхностях ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений (санитарно-гигиеническое требование).

Требования тепловой защиты здания будут выполнены при одновременном выполнении требований 1-2.

### *Поэлементные требования*

Нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R_o^{норм} = R_o^{эн} \cdot m_p, \quad (1.9)$$

где  $R_o^{эн}$  — сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения;  $m_p$  — коэффициент, учитывающий особенности региона строи-

тельства, но не менее значений: для наружных стен  $m_p = 0,63$ ; для окон  $m_p = 0,95$ ; для остальных конструкций  $m_p = 0,8$ .

Строительные нормы допускают определять уровень теплозащиты по величине сопротивления теплопередаче в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями для объектов с избыточными тепловыделениями, а также для реконструируемых зданий.

#### *Комплексное требование*

Нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания принимается в зависимости от отапливаемого объема и градусосуток отопительного периода (табл. 1.2).

Таблица 1.2 - Нормируемые значения удельной тепловой характеристики здания, Вт/(м<sup>3</sup> • град)

Отапливаемый объем, м <sup>3</sup>	Градусосутки отопительного периода, град. • сут				
	1000	3000	5000	8000	12 000
300	0,957	0,708	0,562	0,429	0,326
600	0,759	0,562	0,446	0,341	0,259
1200	0,606	0,449	0,356	0,272	0,207
2500	0,486	0,360	0,286	0,218	0,166
6000	0,391	0,289	0,229	0,175	0,133
15 000	0,327	0,242	0,192	0,146	0,111
50 000	0,277	0,205	0,162	0,124	0,094
200 000	0,269	0,182	0,145	0,111	0,084

#### *Санитарно-гигиеническое требование*

Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции в зоне теплопроводных включений, угловых частей стен и оконных откосов должна быть не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха при расчетной температуре наружного воздуха.

Минимальная температура внутренней поверхности остекления производственных зданий должна быть не ниже значения 0 °С, для остальных зданий — не ниже плюс 3 °С.



Относительная влажность внутреннего воздуха принимается по нормам проектирования соответствующих зданий. Например, для жилых, лечебных и детских учреждений относительная влажность составляет 55 %, для кухонь — 60 %; для ванных комнат — 65 %, для общественных зданий — 60 %.

## **1.2. СОВРЕМЕННЫЕ НИЗКОТЕПЛОПРОВОДНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Наиболее действенным способом повышения энергоэффективности зданий и инженерных сооружений является применение трехслойных ограждающих конструкций с использованием эффективных теплоизоляционных материалов в качестве среднего слоя. При относительно небольших материальных вложениях, применение теплоизоляционной продукции позволяет существенно повысить уровень комфортности, тепло- и звукоизоляцию жилых и производственных зданий. Кроме того, это позволяет сократить эксплуатационные расходы, то есть добиться весомой экономии тепла. Такие факторы эксплуатации зданий, как температурный, и влажностный режим, наличие нагрузок, деформационных воздействий, агрессивных химических агентов предъявляют разные требования к теплоизоляционным материалам. В соответствии с этими требованиями и осуществляется выбор типа материала.

В современном строительстве используется широкий спектр теплоизоляционных материалов, как на ячеистой, так и на волокнистой основе. В ячеистых (вспененных) материалах могут использоваться как минеральные компоненты, так и органические полимеры. Здесь наибольшее распространение получили теплоизоляционные материалы на основе пенополистирола (вспененного или экструдированного), пенополиуретана и вспененных каучуков, пено-, газо- и ячеистых бетонов. В волокнистых материалах, как правило, используется твердая основа минерального происхо-

ждения. Это могут быть базальтовые горные породы, доменные шлаки или стекло.

Физико-технические свойства используемых в строительстве теплоизоляционных материалов оказывают определяющее влияние на теплотехническую эффективность и эксплуатационную надежность конструкций, трудоемкость монтажа, возможность ремонта в процессе эксплуатации.

Основными показателями, характеризующими свойства материалов, являются: плотность, теплопроводность, паропроницаемость, прочность на сжатие при 10% деформации для жестких изделий, морозостойкость, гидрофобность и водостойкость. Кроме того, теплоизоляционные материалы в конструкциях утепления зданий должны соответствовать требованиям пожарной безопасности, иметь гигиенические сертификаты, не выделять токсичные вещества в процессе эксплуатации и при горении.

## **2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ**

### **2.1 РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В НАРУЖНОМ ОГРАЖДЕНИИ ДЛЯ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ**

Для оценки теплотехнических качеств ограждения необходимо знать не только его термическое сопротивление, но также значения температуры в любой плоскости ограждения при заданных постоянных значениях температуры воздуха с обеих сторон ограждения. Особенно большое значение имеет температура внутренней поверхности ограждения, так как от нее зависят, тепловой комфорт помещения и возможность образования конденсата. Распределение температуры в ограждении необходимо знать для расчета влажностного режима ограждения.

Исходя из условий стационарности теплового потока через ограждение, температуру внутренней поверхностей, наружной поверхности и в любом сечении ограждающей конструкции определяют соответственно по формулам

$$t_{\text{в}} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{о}}} R_{\text{в}}, \quad (2.1)$$

$$t_{\text{н}} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{о}}} R_{\text{н}} \quad (2.2)$$

$$t_{\text{х}} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{о}}} (R_{\text{в}} + R_{\text{н}}), \quad (2.3)$$

где  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{н}}$ ,  $t_{\text{х}}$  – температура, соответственно, внутренней, наружной поверхностей и в любом сечении ограждения, °С;  $R_{\text{х}}$  – термическое сопротивление части ограждения от внутренней поверхности до заданного сечения, м<sup>2</sup> °С/Вт;  $R_{\text{в}}$  – термическое сопротивление теплообмену на внутренней поверхности ограждения, м<sup>2</sup> °С/Вт.

При выполнении работы необходимо рассчитать температуру внутренней и наружной поверхностей стены, а также температуру на границе отдельных слоев при  $t_{\text{н}} = t_{\text{н.п}}$ ; сделать вывод о выполнении требования ( $t_{\text{в}} \geq t_{\text{в}} - \Delta t^{\text{н}}$ ).

Для определения значений температуры в многослойном ограждении можно воспользоваться графическим методом, который является наиболее удобным и наглядным. График зависимости температуры внутри ограждения от термического сопротивления является прямой линией, на горизонтальной оси откладывают последовательно в масштабе все термические сопротивления передаче теплоты из помещения в окружающую среду, начиная с  $R_{\text{в}}$  и кончая  $R_{\text{н}}$ , так, чтобы сумма всех отрезков была равна величине общего сопротивления теплопередаче ограждения (рис.2.1 а). Через полученные точки проводят вертикальные линии и откладывают в масштабе на вертикальной линии, проходящей через начало отрезка  $R_{\text{в}}$ , отрезок, соответствующий температуре внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}$ , а на вертикальной линии, проходящей через конец отрезка  $R_{\text{н}}$  – отрезок, соответствующий наружной температуре  $t_{\text{н}}$ . Полученные точки  $t_{\text{в}}$  и  $t_{\text{н}}$  соединяют прямой линией. Точки пересечения этой прямой с соответствующими вертикальными линиями соответствуют значению температуры на границах слоев ограждения.

При переносе температурной линии на разрез конструкции огражде

ния (рис.2.1 б) наклон ее изменяется на стыке слоев конструкции, состоящих из материалов с различным коэффициентом теплопроводности, так как горизонтальные размеры на чертеже будут выражаться не в масштабе термических сопротивлений слоев, а в масштабе их толщин.

На данном графике необходимо нанести температурные линии при температурах наружного воздуха каждого месяца.

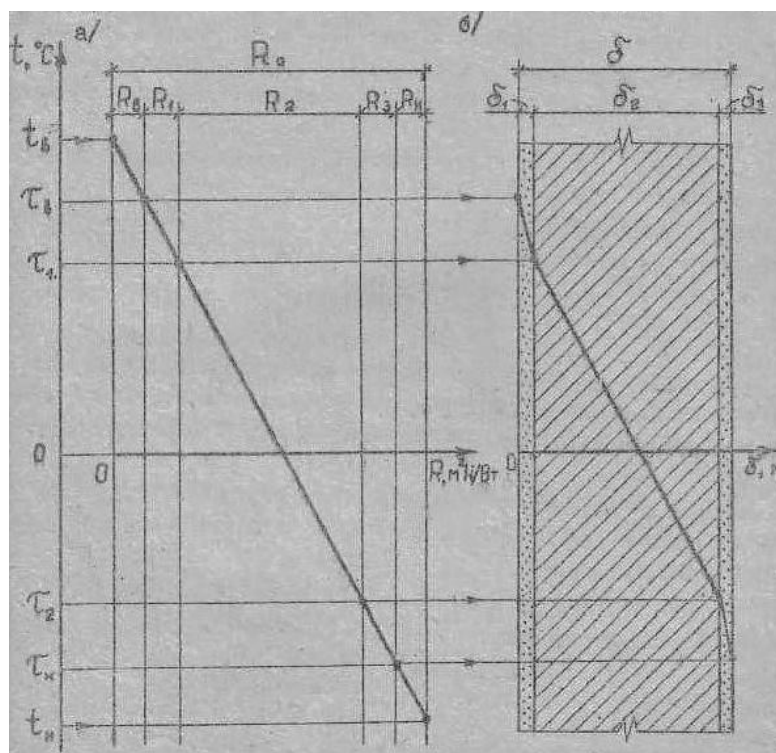


Рис.2.1. Построение стационарного температурного поля в многослойном наружном ограждении: а - в масштабе термических сопротивлений; б - в сечении стены

## 2.2 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАРУЖНОГО УГЛА

При проектировании ограждающих конструкций и систем отопления зданий с целью предотвращения возможности образования конденсата важно знать температуру внутренней поверхности наружного угла.

Температура внутренней поверхности наружного угла стены в диапазоне  $R_0$  от 0,43 до 2,15 м<sup>2</sup>°C/Вт приблизительно может быть определена по формуле

$$\tau_{yz} = \tau_s - 0,18(1 - 0,23R_0)(t_s - t_n) \quad (2.4)$$

где  $\tau_s$  - температура внутренней поверхности глады ограждения (в отдалении от угла), определяемая по формуле при расчетной зимней температуре наружного воздуха  $t_n$  с учетом тепловой инерции стены.

### 3. РАСЧЕТ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НАРУЖНОЙ СТЕНЫ

Влажностный режим наружного ограждения неразрывно связан с его теплозащитными свойствами. Конденсация водяного пара на поверхности ограждения и в его толще способствует разрушению ограждения, ухудшает микроклимат в помещении. Поэтому при проектировании ограждений необходимо предусмотреть мероприятия, предотвращающие возможность образования конденсата.

#### 3.1. ПРОВЕРКА НА ОТСУТСТВИЕ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГЛАДИ НАРУЖНОЙ СТЕНЫ И НАРУЖНОГО УГЛА

Во избежание конденсации водяного пара на внутренней поверхности глады ограждения и наружного угла необходимо, чтобы их температура  $\tau$  была не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха, т.е.  $\tau \geq t_s$

Проверку выполнения этого условия удобнее выполнять, сравнивая упругость водяного пара внутреннего воздуха при его расчетной температуре  $t_s$  и относительной влажности  $\varphi_s$  с максимальной упругостью водяного пара  $E_{\tau_s}$  при температуре  $\tau_s$ , определенной из условия  $t_n = t_{n,л}$  и  $E_{\tau_{yr}}$  при температуре  $\tau_{уг}$ .

Упругость водяного пара внутреннего воздуха  $e_v$  (Па) определяется по формуле

$$e_s = E_{t_s} \frac{\varphi_s}{100}$$

где  $E_{t_s}$  - максимальная упругость водяного пара внутреннего воздуха при его расчетной температуре, Па.

Величины  $E_{t_s}$ , и  $E_\tau$  определяют в зависимости от температур  $t_s$  и  $\tau$  формуле М.И.Фильнея

$$E_t = 10 \frac{657.23 + 10.24t}{236 + t} \quad (3.1)$$

Если  $e_s \leq E_\tau$ , то конденсация отсутствует, в противном случае нужно предусмотреть меры, предупреждающие конденсацию водяного пара (увеличение общего сопротивления теплопередаче, установка в углу отопительного стояка и т.п.).

### 3.2.ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПАРПРОНИЦАНИЮ НАРУЖНОЙ СТЕНЫ И ПОСТРОЕНИЕ ЗОНЫ ВОЗМОЖНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА В ЕЕ ТОЛЩЕ

Анализ влажностного режима толщи наружной стены проводится исходя из стационарного состояния и с учетом только диффузии водяного пара через ограждение. В результате анализа необходимо убедиться в отсутствии конденсации водяного пара в толще стены при средней температуре наиболее холодной пятидневки. В противном случае необходимо определить положение зоны конденсации в толще стены. А затем выполнять расчет при средней температуре каждого месяца, определив в каком из них конденсат полностью удаляется из ограждения.

Общее сопротивление паропроницанию конструкции стены  $R_{\text{оп}}$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{чПа/мг}$ )

$$R_{\text{оп}} = R_{\text{с.н}} + \sum R_{\text{ин}} + R_{\text{нн}} \quad (3.2)$$

где  $R_{en}$  - сопротивление влагообмену на внутренней поверхности ограждения, принимается равным  $0,0266(\text{м}^2 \text{ ч Па/мг})$ ,  $R_{in}$  - сопротивление паропроницанию  $i$ -го слоя ограждения ( $\text{м}^2 \text{ ч Па/мг}$ ),

$$R_{in} = \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (3.3)$$

$R_{np}$  - сопротивление влагообмену на наружной поверхности, принимается равным  $0,0053 (\text{м}^2 \text{ чПа/мг})$ ;  $\mu_i$ - коэффициент паропроницаемости материала  $i$ -го слоя, ( $\text{м}^2 \text{ чПа/мг}$ ) .

Упругость водяного пара в произвольном сечении  $X$   $e_x$  определяется по формуле

$$e_x = e_e - \frac{e_e - e_n}{R_{on}} R_{en-x} \quad (3.4)$$

где  $R_{вп-х}$ - сопротивление паропроницанию от воздуха помещения до сечения  $X$ , в котором определяется упругость  $e_x$ ;  $e_n$  - упругость водяного пара наружного воздуха, определяется по известным значениям температуры наружного воздуха и относительной влажности наружного воздуха.

Для построения зоны возможной конденсации сечение наружной стены вычерчивается в масштабе сопротивлений паропроницанию с учетом сопротивлений влагообмену на поверхностях  $R_{вп}$  и  $R_{np}$  (рис.3.1). На этом сечении восстанавливается ранее построенная линия распределения температуры при  $t_n$ . С учетом линейного изменения упругости водяного пара строится линия распределения  $e$  по сечению стены. Для этого на условных поверхностях ограждения, образованных прибавлением сопротивлений влагообмену  $R_{вп}$  и  $R_{np}$  к сопротивлению паропроницанию материальных слоев  $\sum R_{in}$ , откладываются значения  $e_v$  и  $e_n$  . Полученные точки соединяются прямой линией.

По известным значениям температуры в сечении стены в том же масштабе строится кривая изменения максимальной упругости водяного пара  $E$ . Для более точного построения линии  $E$  наиболее широкие слои ограждения разбиваются на пять или более элементарных слоев.

Если линии  $E$  и  $e$  пересекаются, то это указывает на наличие в ограждении условий для конденсации в ней водяного пара.

Для построения линии действительного изменения упругости водяного пара в ограждении из точек  $e_n$  и  $e_b$  на условных поверхностях стены

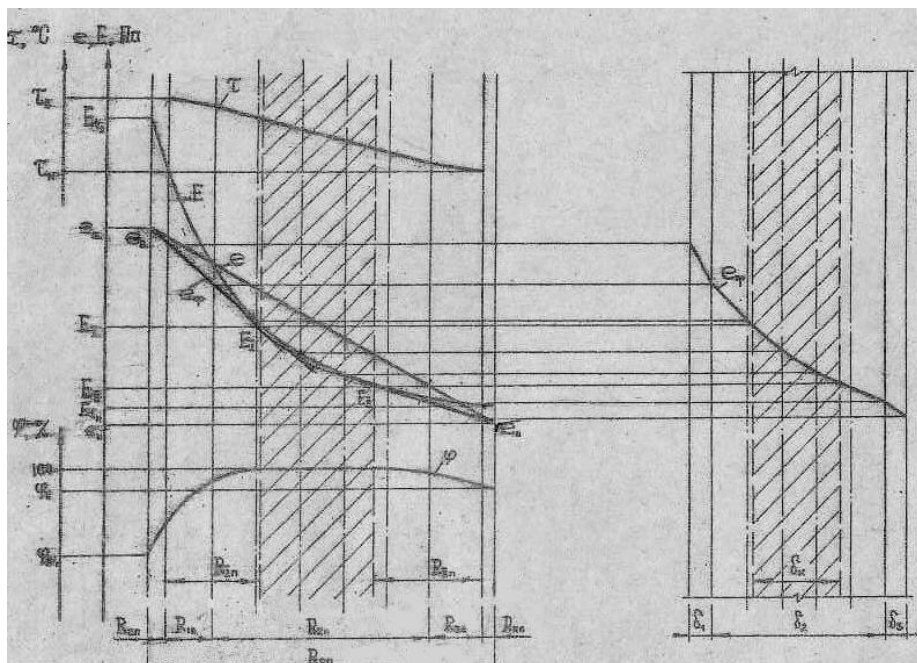


Рис. 3.1 Построение зоны возможной конденсации водяного пара в многослойной конструкции ограждения

проводятся касательные к линии максимальной упругости водяного пара. Таким образом, получается линия  $e_b E_I E_{II} e_n$  действительного изменения упругости водяного пара в толще стены. На прямолинейных участках этой линии  $e_b E_I$  и  $E_{II} e_n$  изменение упругости водяного пара происходит только за счет сопротивления паропроницанию. На криволинейном участке  $E_I E_{II}$ , совпадающем с линией  $E$ , изменение упругости пара происходит за счет его конденсации. Плоскости, параллельные поверхностям ограждения и проходящие через точки  $E_I$  и  $E_{II}$ , являются границами зоны возможной конденсации.

Переносом линии  $e_b E_I E_{II} e_n$  на сечение стены, вычерченное в масштабе толщин слоев, определяются положение и толщина зоны возможной конденсации  $\delta_k$  (рис.3.1).



Количество конденсата в ограждении  $P_w$ - определяется по разности удельных потоков водяного пара, притекающего к зоне возможной конденсации  $P_1$  и уходящего от нее  $P_2$  (мг/м<sup>2</sup>ч))

$$P_w = P_1 - P_2, \quad (3.5)$$

$$P_1 = \frac{e_6 - E_1}{R_{en} + R_{in}}, \quad P_2 = \frac{E_6 - e_n}{R_{2n} + R_{nn}} \quad (3.6)$$

где  $R_{in}$  - сопротивление паропроницанию части стены от внутренней поверхности до внутренней границы зоны возможной конденсации;  $R_{in}$  - сопротивление паропроницанию части стены от наружной границы зоны возможной конденсации до наружной поверхности стены (рис.3.1).

Если линия  $E$  оказывается везде выше линии  $e$ , то конденсации в ограждении не будет и линия действительного изменения упругости водяного пара совпадает с линией  $e$ . Удельный поток водяного пара  $P$  (мг/м<sup>2</sup>ч) через ограждение в этом случае определяется по формуле

$$P = \frac{e_6 - e_n}{R_{on}} \quad (3.7)$$

Если линия  $E$  оказывается везде ниже линии  $e$ , то все ограждение находится в зоне возможной конденсации и линия действительного изменения упругости водяного пара совпадает с линией  $E$ .

Внутри ограждения изменяется также относительная упругость водяного пара  $\phi$ . Для построения линии относительной упругости необходимо определить значение  $\phi_x$  в характерных сечениях ограждения по значениям  $e_x$  и  $E_x$ , полученным из графика.

При выполнении работы необходимо построить линии изменения  $\tau$ ,  $e$ ,  $\phi$  действительной упругости водяного пара  $e_d$ , в зависимости от  $R_n$  определить значения  $R_{In}$ ,  $R_{Inn}$ ,  $P_w$  или  $P$ .

На сечение стены переносят линию изменения действительной упругости водяного пара в толще стены и границы зоны возможной, конденсации.

## **ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Исходя из выполненных расчетов и построений сделать выводы и дать рекомендации по дальнейшей эксплуатации наружного ограждения.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Основы обеспечения микроклимата зданий[Электронный ресурс] : Учебник для вузов / Самарин О.Д. - М. : Издательство АСВ, 2015. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930939392.html>

Авторы Самарин О.Д. Издательство АСВ Год издания 2015 Прототип: Электронное издание на основе: Основы обеспечения микроклимата зданий: Учебник для вузов. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 204 с. - ISBN 978-5-93093-939-2.

2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учебник для вузов / В.Н.Богословский. — 3-е изд. — СПб. : Авок Северо-Запад, 2006. — 400с. — (Инженерные системы зданий). — Библиогр. В конце кн. — ISBN 5-902146-10-0/в пер./: 180.00.

3. Еремкин А. И. Тепловой режим зданий : учеб. пособие для вузов / А. И. Еремкин , Т. И. Королева .— Ростов-н/Д : Феникс, 2008 .— 365 с. : ил ил .— (Высшее образование) .— Библиогр.: с. 358-360 .— ISBN 978-5-222-12605-9 (в пер.) .

4. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Учеб. Пособие. Ч.1. Теоретические основы создания микроклимата в помещении / В.И. Полушкин, О.Н. Русак, С.И. Бурцев и др. — СПб.: Профессия, 2002. — 176с.: ил. — (Специалист). — Библиогр. В конце кн.—ISBN5-93913-031-3/впер./145.48.

5.Свод правил СП 50. 13330.12. Тепловая защита зданий: Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Введ. 01.01.2013. М. : Минрегион России, 2012. 78 с.

6. Изменение №1 к СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» : Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Введ.15.06.2019. М.: Стандартинформ, 2018. 78 с.

7. Свод правил СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Введ. 29.05.2018 г. М.: Стандартинформ, 2019. 113 с.

8. Свод правил СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Введ. 17.06.2017. М. : АО "Кодекс", 2016. 80 с.