

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

В.Н. Куприянов

**КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Монография

Казань
2022

УДК 621.134.8+721.012.8
ББК 38.2
К92

Куприянов В.Н.

К92 Конденсация водяного пара и проектирование ограждающих конструкций: Монография /В.Н. Куприянов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архит.- строит. ун-та, 2022. – 115 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В монографии систематизированы и обобщены многолетние исследования автора по оценке и регулированию конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях проектными средствами. Исследования основаны на анализе причин повреждений и разрушений ограждающих конструкций после нескольких лет эксплуатации зданий.

Оригинальность исследований заключается в совместном анализе параметров ограждающих конструкций и климатических факторов места строительства. Введено новое научное понятие «Температура начала конденсации», которое является конструктивной характеристикой конкретного ограждения и индикатором его переувлажнения.

Разработан новый метод анализа закономерностей конденсации водяного пара, который значимо отличается от традиционных методов строительной теплофизики. Метод предусматривает определение сопротивлений влагообмену у поверхности ограждения, а также температуры начала конденсации заданного ограждения и оценку количества конденсата в ограждении за зимний период.

Итогом работы является метод проектирования ограждающих конструкций, который позволяет изменением конструктивного решения и подбором свойств материальных слоев уменьшать или исключать конденсации водяного пара в заданном климате.

Для магистров и аспирантов, обучающихся по направлениям «Строительство» и «Архитектура», а также для инженерно-технических работников проектных организаций.

Ил. 43, табл. 16, числовых примеров 14, библиогр. 52 наимен., приложений 3

Рецензенты:

Кандидат технических наук, директор ООО РС-Концепт

Р.И. Шафигуллин

Кандидат технических наук, доцент кафедры ТГВ КазГАСУ

Д.В. Крайнов

УДК 621.134.8+721.012.8
ББК 38.2

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2022
© Куприянов В.Н., 2022

Предисловие

Известно, что конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях негативно влияет на их эксплуатационные свойства. При увеличении влажности материалов за счет конденсации водяного пара снижается их теплозащита, нарастают коррозионные процессы, возникают дефекты и разрушения наружных слоев за счет многократного замораживания и оттаивания.

Негативные процессы в ограждающих конструкциях наиболее остро стали проявляться после перехода строительной отрасли на повышенную теплозащиту и появления многослойных ограждений с эффективными теплоизоляционными материалами. Однако в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» основное внимание продолжает уделяться теплозащите и энергосбережению, а переносу водяного пара через ограждение и его конденсации не уделено должного внимания. В результате, конденсация водяного пара в многослойных ограждениях стала носить неконтролируемый характер, вследствие чего начали возникать дефекты и разрушения.

Исследованию температурно-влажностного режима ограждающих конструкций посвящено большое количество фундаментальных работ. Это научные школы Богословского В.Н., Гагарина В.Г., Федосова С.В. Однако эти исследования не доведены до практического использования в проектных организациях. До настоящего времени отсутствуют практические рекомендации по выбору материалов ограждающих конструкций, по взаимному расположению материальных слоев, по привязке конструкции ограждения к климатическим условиям места строительства. Отсутствие подобных рекомендаций сдерживает реальное конструирование ограждений и затрудняет прогнозирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях в заданном климате.

Монография основана на многолетних исследованиях автора с сотрудниками, на анализе причин возникновения дефектов и разрушений многослойных ограждающих конструкций после нескольких лет их эксплуатации, на опытном проектировании ограждающих конструкций и изучении закономерностей конденсации в них водяного пара в различных климатических условиях. В итоге исследований разработан метод проектирования ограждающих конструкций, который позволяет проектными средствами ограничивать или исключать конденсацию водяного пара в зависимости от климатических условий места строительства.

Автор благодарит за помощь в подготовке рукописи аспиранта Буштец Дарью. Особую благодарность выражает рецензентам: кандидату технических наук Шафигуллину Р.И. и кандидату технических наук, доценту Крайнову Д.В. за неоценимую помощь и советы при анализе рукописи.

1. ПЕРЕНОС ТЕПЛА И ВОДЯНОГО ПАРА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ

Эксплуатация зданий и сооружений сопровождается переносом тепла и водяного пара через ограждающие конструкции в атмосферный воздух. В зимние месяцы эти потоки максимальные, к лету они ослабевают и даже могут изменить направление на противоположное.

Интенсивность теплового потока Q растет с увеличением разности температур между внутренним и наружным воздухом $(t_{в} - t_{н})$ и снижается при увеличении сопротивления теплопередаче ограждения $R_{ТО}$:

$$Q = \frac{t_{в} - t_{н}}{R_{ТО}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (1.1)$$

Увеличение нормативных значений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций $R_{ТО}$ стало основой перехода на повышенную теплозащиту. Величиной теплового потока определяются теплопотери зданий, расход энергии на отопление и в целом энергоэффективность проектных решений.

Побудителем переноса водяного пара G является разность парциальных давлений водяного пара во внутреннем и наружном воздухе $(e_{в} - e_{н})$. Интенсивность потока снижается при увеличении сопротивления паропроницаемости ограждающей конструкции $R_{ПО}$:

$$G = \frac{e_{в} - e_{н}}{R_{ПО}}, \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч)} \quad (1.2)$$

Однако требования к величине $R_{ПО}$ в нормативных документах не регламентированы, хотя очевидно, что с ростом G будет возрастать количество конденсата.

Поток водяного пара формирует в порах материалов распределение парциального давления по сечению ограждения e_i , а распределение температур по сечению ограждения τ_i формирует распределение давления насыщения водяного пара E_i . По соотношению между давлениями e_i и E_i определяется относительная влажность воздуха в порах материала φ , которая в отдельных случаях может достигать 100%, когда $E = e$, и в этом сечении возникает конденсация водяных паров.

Из этого следует, что процессы переноса тепла и водяного пара взаимосвязаны. В каждом материальном слое ограждения перенос тепла и водяного пара проходит через один материал с двумя характеристиками: теплопроводностью λ и паропроницаемостью μ . Проектирование ограждающих конструкций с позиции только одного процесса непременно отразится на характеристиках другого процесса и не всегда в положительном направлении.

В настоящее время процессы переноса тепла и водяных паров рассматриваются отдельно.

1.1. Обеспечение теплозащиты зданий

Важнейшей эксплуатационной характеристикой зданий является расход энергии на его отопление, поэтому процессу переноса тепла, снижению расходов на отопление уделялось повышенное внимание. В конце прошлого века повышение энергоэффективности зданий приобретает государственное значение и отражено в нескольких федеральных законах. В развитие этих законов в строительных нормах предписано требование по увеличению теплозащиты зданий. В результате требуемое сопротивление теплопередачи ограждающих конструкций было увеличено в три раза, а в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [1] (далее – СП 50) детально расписано проектирование теплозащиты через определение ряда теплотехнических показателей:

1. Базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций
2. Нормируемое значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций
3. Термическое сопротивление ограждающих конструкций
4. Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций
5. Коэффициенты теплопередачи внутренней поверхности ограждающих конструкций
6. Коэффициенты теплопередачи наружной поверхности ограждающих конструкций
7. Нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции
8. Нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию
9. Нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания
10. Классы энергосбережения зданий

1.2. Защита от переувлажнения ограждающих конструкций

Проектирование защиты ограждающих конструкций от переувлажнения не имеет такой детализации, как проектирование теплозащиты. СП 50 не содержит правил проектирования сопротивления паропрооницанию ограждения, которое бы обеспечивало его защиту от переувлажнения. **В СП 50 приведен лишь метод контроля ограждения, разработанного из условий теплозащиты.**

Метод сравнивает сопротивление паропроницанию части разработанного ограждения от внутренней поверхности до плоскости конденсации $R_{\text{пкв}}$ с требуемым сопротивлением паропроницанию той же части ограждения $R_{\text{пкв}}^{\text{тр}}$, которое определено расчетным путем из двух условий:

- 1) условия ненакопления влаги в ограждении за годовой период;
- 2) условия ограничения количества влаги в ограждении за период влагонакопления.

Если $R_{\text{пкв}}$ ограждения, разработанного из условий теплозащиты будет больше требуемого $R_{\text{пкв}}^{\text{тр}}$, определенного по каждому условию, то предполагается, что разработанная конструкция ограждения соответствует требованиям защиты от переувлажнения.

Если окажется, что $R_{\text{пкв}} < R_{\text{пкв}}^{\text{тр}}$, то СП 50 не дает никаких рекомендаций по проектированию.

Первое условие логично и физически обоснованно, оно основано на равенстве диффузионных потоков водяного пара через ограждение от внутренней поверхности до плоскости конденсации $G_{\text{в}}$ и от плоскости конденсации до наружной поверхности $G_{\text{н}}$:

$$G_{\text{в}} = \frac{(e_{\text{в}} - E)}{R_{\text{пкв}}^{\text{тр}}} = \frac{(E - e_{\text{н}})}{R_{\text{пкн}}} = G_{\text{н}} \quad , \quad (1.3)$$

где E – давление насыщения водяного пара в плоскости конденсации.

Во втором условии не прослеживается физики процесса и не ясно, с какой целью введено предельное приращение влажности $\Delta\omega$: снижение теплозащиты, коррозия, старение, разрушение материалов или что-то еще?

При расчетах защиты от переувлажнения по методу СП 50 выявляется ряд неточностей и неопределенностей. Так, при определении сопротивления паропроницанию ограждающих конструкций нормы не учитывают сопротивления влагоперехода у внутренней $R_{\text{пв}}$ и наружной $R_{\text{пн}}$ поверхностей ограждения, что не может не влиять на точность расчетов.

Результаты расчетов по защите от переувлажнения ограждающих конструкций в значительной степени зависят от определения периода увлажнения и расположения плоскости конденсации. Учет месяцев с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха, принятый в СП 50, не является достаточным обоснованием для условий конденсации водяного пара в ограждении, которая может происходить и при положительных температурах, если наступает состояние «точки росы», когда давление насыщения водяного пара в плоскости конденсации E будет равно его парциальному давлению e , то есть $E = e$ и $\phi = 100\%$. Это ключевое условие конденсации водяного пара

отсутствует в нормативных документах по расчету переувлажнения ограждающих конструкций.

В нормативных документах по теплозащите всех лет изданий до 2012 года [2–8] расположение плоскости конденсации определялось для однослойных конструкций – на расстоянии $2/3$ толщины ограждения от внутренней поверхности, для многослойных – на наружной поверхности утеплителя, что было обосновано практикой эксплуатации ограждающих конструкций.

В 2012 году в нормы по теплозащите [1] введен новый метод определения температуры в плоскости максимального увлажнения и расположения этой плоскости через комплекс $f(t_{m,y.})$, что добавило сложность в расчеты, но не увеличило их точность. Понимая это, в СП 345.1325800.2017 [9] продолжено совершенствование методов определения температуры и расположения плоскости максимального увлажнения, что также не привело ни к повышению точности расчетов, ни к их упрощению, что для проектных организаций является существенным обстоятельством.

1.3. Ошибки проектных решений и их последствия

Почему проектирование защиты ограждающих конструкций от переувлажнения проработано в нормативных документах не так детально, как проектирование теплозащиты, да еще с неточностями и неопределенностями? Хотя известно, что неконтролируемая конденсация водяных паров в ограждающих конструкциях способна увеличить теплопотери зданий, привести к образованию плесени, коррозии материалов, а многократное увлажнение–высушивание, замораживание–оттаивание приводит к разрушению наружных слоев ограждения.

Можно предположить, что основа такой «недоработанности» норм исходит из однослойных наружных стен, выполняемых из природных и искусственных каменных материалов, которые были основным конструктивным решением наружных ограждений за прошедшие тысячелетия. За этот период при эксплуатации жилых и общественных зданий, то есть зданий с нормальным температурно-влажностным режимом помещений, не выявлено систематических разрушений однослойных ограждающих конструкций.

Однослойные конструкции стен были основными при создании первых отечественных норм по строительной теплотехнике в середине 50-х годов прошлого века и оставались такими до середины 90-х годов.

С переходом строительной отрасли на повышенную теплозащиту (90-е годы прошлого века) появились многослойные ограждающие конструкции с

эффективными теплоизоляционными материалами, закономерности переноса водяного пара через которые значительно отличаются от паропроницаемости однослойных стен. Однако нормативная база не учитывала эту специфику, и раздел норм по защите от переувлажнения переносился при переиздании норм практически без изменений.

Таким образом, в 90-е годы прошлого века вся территория страны стала экспериментальной площадкой по испытанию различных видов и типов многослойных ограждающих конструкций. Иногда это положительный опыт, иногда – отрицательный, который проявляется различными разрушениями ограждающих конструкций. Анализ разрушений [10–14] ограждающих конструкций позволил установить причины этих разрушений. Можно выделить две группы причин разрушений: это ошибки проектных решений и ошибки производства работ.

К ошибкам проектных решений относятся:

- Недостаточное армирование кладки облицовочных слоев
- Отсутствие требований к форме растворных швов (вогнутый шов при щелевых облицовочных кирпичах приводит к замачиванию пустот)
- Гибкие связи, кладочные сетки и анкера выполняются из некоррозионно-стойкой стали
- Отсутствие расчетов по влагонакоплению и защите конструкций от конденсата и коррозии.

К ошибкам производства работ относятся:

- Массовые отступления от проектных решений в части замены металла, кирпича, блоков, утеплителя, анкеров и т.д.
- Невыполнение строительных допусков
- Уменьшение количества анкерных связей для крепления теплоизоляционных и облицовочных слоев к конструкционному слою.

На рисунке 1.1 представлены наиболее типичные дефекты и разрушения многослойных ограждающих конструкций.

Краткий анализ несоответствий, сложившихся между проектированием теплозащиты и защиты от переувлажнения многослойных ограждающих конструкций и причин их разрушения в эксплуатации, позволил установить, что закономерности переноса водяного пара через многослойные ограждения, условия конденсации в них водяного пара и соответствие разрабатываемого конструктивного решения ограждения тем или иным климатическим условиям эксплуатации требуют дальнейших исследований и разработки рекомендаций по проектированию многослойных ограждающих конструкций зданий заданной теплозащиты и защиты от переувлажнения.

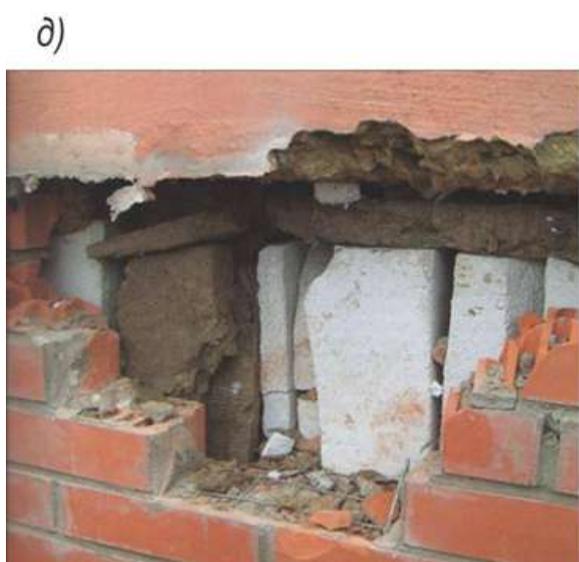
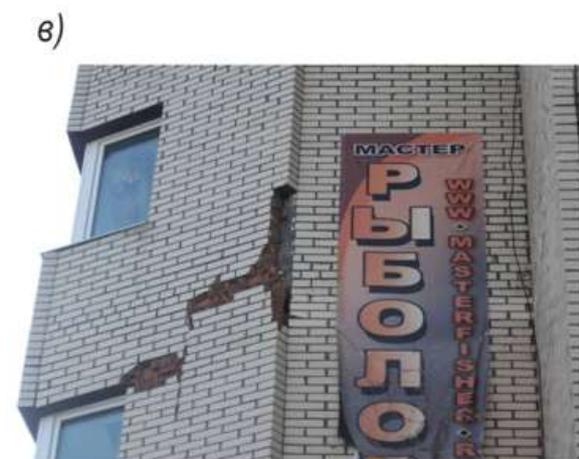


Рис. 1.1. Дефекты и разрушения в многослойных ограждающих конструкциях:
 а, б) разрушение глазурованного слоя керамического кирпича по линии перекрытий и перемычек; в) разрушение глазурованного слоя керамического кирпича в угловой зоне; г, д) разрушение щелевого керамического кирпича при затекании дождевой воды через вогнутый растворный шов и ее замерзание внутри щелей; е) разрушение облицовочного щелевого кирпича при некачественно выполненной теплоизоляции

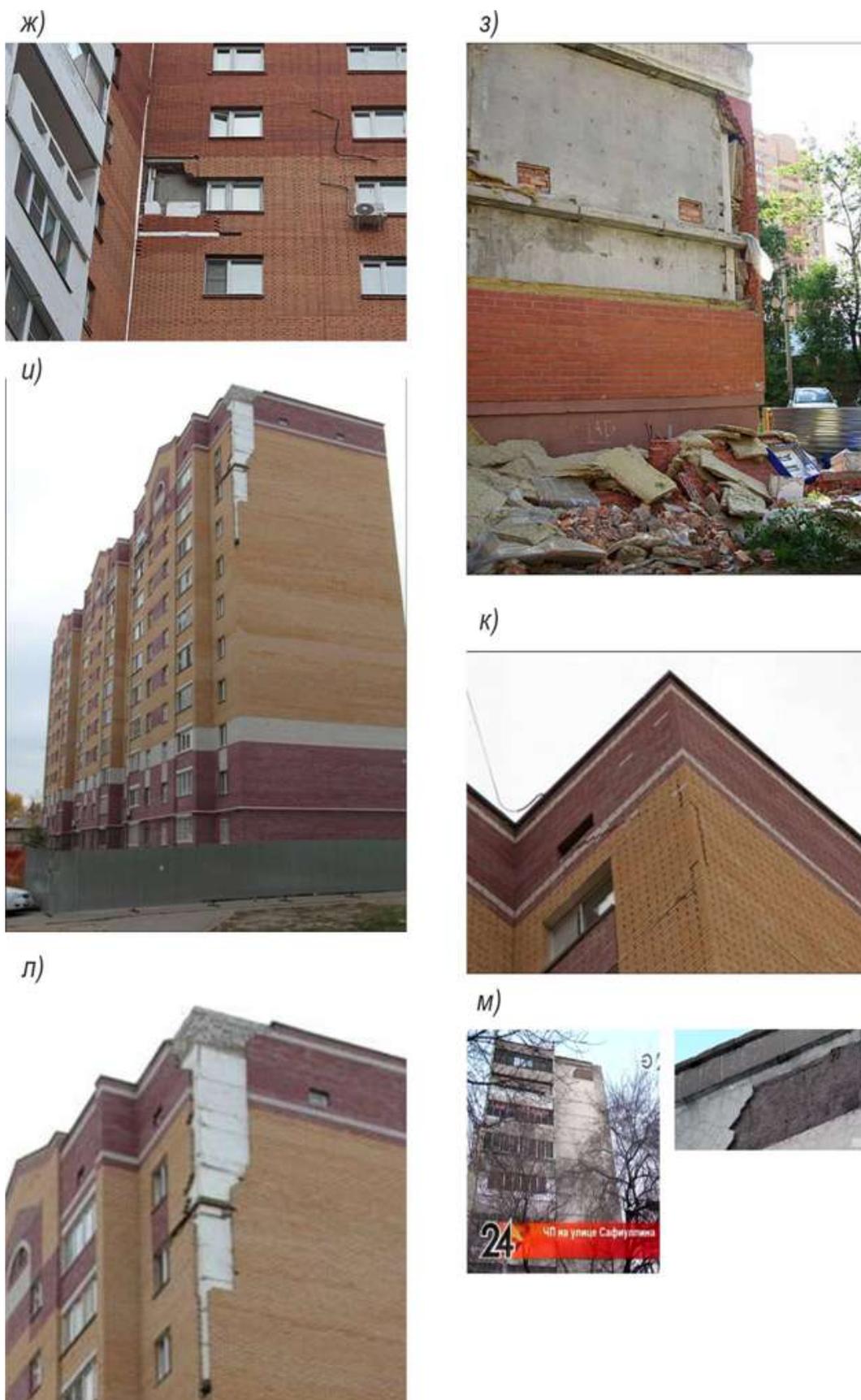


Рис. 1.1. (Окончание). Дефекты и разрушения в многослойных ограждающих конструкциях:
 ж, з) разрушение кирпичной облицовки вместе с утеплителем; и, к, л) разрушение
 кирпичной облицовки по утеплителю из пенопласта; м) разрушение плотного слоя
 наружной штукатурки по керамзитобетонной панели

2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

2.1. Влажность воздуха и температура точки росы

Атмосферный воздух состоит из смеси различных газов (азот, кислород и др.) и водяных паров, количество которых относительно невелико и составляет 0,2% в северных широтах и 2,6% – у экватора. Влажный воздух характеризуется двумя параметрами: абсолютной влажностью и относительной влажностью.

Абсолютная влажность воздуха определяется количеством граммов влаги, содержащейся в 1 м³ воздуха, a (г/м³), или парциальным давлением водяных паров в паскалях, e (Па) (т.е. давлением водяного пара, находящегося в смеси с другими газами). Парциальное давление водяного пара часто называют упругостью водяного пара.

Относительная влажность воздуха (φ) представляет собой отношение действительного влагосодержания a (г/м³), или действительной упругости водяного пара e (Па), к максимальному влагосодержанию A (г/м³), или давлению насыщения водяного пара E (Па) при данной температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100, \% ; \quad \varphi = \frac{a}{A} \cdot 100, \% . \quad (2.1)$$

Из определения относительной влажности воздуха следует, что значения A и E **относятся к конкретной температуре воздуха**. При увеличении температуры воздуха (при неизменном барометрическом давлении) возрастает способность воздуха к аккумулярованию влаги и увеличивается предел содержания влаги в воздухе A (г/м³) и давление насыщения водяного пара E (Па), рис. 2.1.

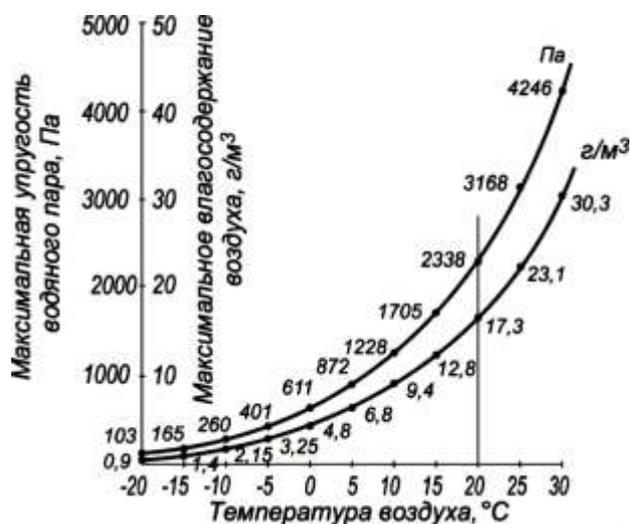


Рис. 2.1. Зависимость максимального влагосодержания (г/м³) и давления насыщения водяного пара (Па) от температуры воздуха

Из рисунка 2.1. видно, что при температуре воздуха + 20°C воздух способен удерживать 17,3 г/м³, а при температуре –20°C – только 0,9 г/м³. Следовательно, при определенной температуре максимальное влагосодержание может стать равным действительному, то есть $A = a$, $E = e$, $\varphi = 100\%$, и начнется конденсация водяного пара из воздуха. Температуру, при которой наступает полное насыщение воздуха влагой, называют **температурой точки росы**.

Пример 2.1. Определить закономерность конденсации водяного пара в помещении с влажностью $a = 12,8 \text{ г/м}^3$ при изменении температуры воздуха в помещении с +25°C до +5°C.

Решение представлено на рисунке 2.2, из него следует, что при температуре +25°C относительная влажность воздуха $\varphi = (12,8/23,1) \cdot 100\% = 55,4\%$. При температуре +15°C $\varphi = (12,8/12,8) \cdot 100\% = 100\%$ и начинается конденсация водяного пара, а при температуре +5°C $\varphi = 100\%$ и часть влаги из воздуха $12,8 - 6,8 = 6 \text{ г/м}^3$ выпадает в виде конденсата.

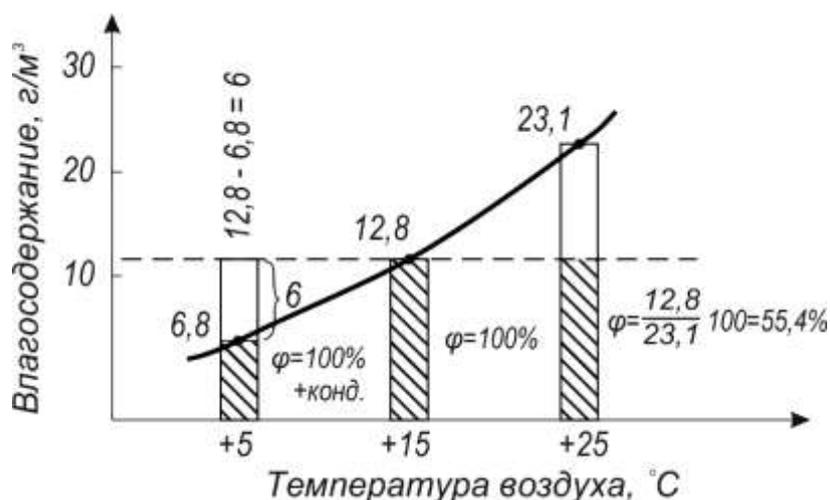


Рис. 2.2. Зависимость относительной влажности воздуха и конденсации водяных паров от температуры

В нормативной литературе по проектированию теплозащиты зданий температуру точки росы определяют по соотношению между температурой и относительной влажностью воздуха в помещении (табл. 2.1).

Из таблицы 2.1 следует, что с ростом температуры или относительной влажности воздуха в помещении увеличивается температура точки росы. Даже на границах комфортных условий температура точки росы изменяется более чем в два раза: с 6°C до 13,9°C (выделено жирным). Этот факт требует

контроля температуры внутренних поверхностей наружных стен, особенно в зонах теплотехнических неоднородностей.

В природной среде абсолютная и относительная влажность воздуха изменяются по месяцам года в противоположных направлениях. В летние месяцы в воздухе содержится максимальное количество влаги – до 12–14 г/м³, но относительная влажность имеет минимальные значения – 60–65%. В зимние месяцы картина противоположная: относительная влажность воздуха максимальная – до 90%, но количество влаги в воздухе минимально и не превышает 2–4 г/м³ (рис. 2.3). Следует также отметить, что относительная влажность воздуха имеет большие суточные амплитуды; так, для Казани они составляют 25–35%.

Таблица 2.1

Зависимость температуры точки росы в помещении от температуры и относительной влажности воздуха

Температура внутреннего воздуха, °С	Относительная влажность воздуха в помещении, %					
	40	50	60	70	80	90
-5	-15,3	-12,9	-10,8	-9,1	-7,6	-6,2
0	-10,6	-8,1	-6,6	-4,3	-2,7	-1,3
5	-6,7	-4,0	-1,9	-0,01	1,8	3,5
10	-2,6	0,1	2,6	4,8	6,7	8,4
15	1,5	4,7	7,3	9,6	11,6	13,4
18	4,2	7,4	10,1	12,5	14,5	16,3
20	6,0	9,3	12,0	14,4	16,4	18,3
22	7,8	11,1	13,9	16,3	18,4	20,3
25	10,5	13,9	16,7	19,2	21,3	23,2
30	14,9	18,4	21,4	23,9	26,2	28,2
35	19,4	23,0	26,1	28,7	31,0	33,1

Из рисунка 2.3 видно, что в декабре–январе–феврале в атмосферном воздухе содержится 1–2 г/м³ влаги, следовательно, **зимний воздух является сухим.**

При правильном воздухообмене сухой зимний воздух будет снижать влажность воздуха в помещении. Экспериментальные измерения влажности воздуха в двух жилых квартирах в течение двух сезонов позволили установить, что относительная влажность воздуха в зимние периоды находилась в интервале 27–32%.

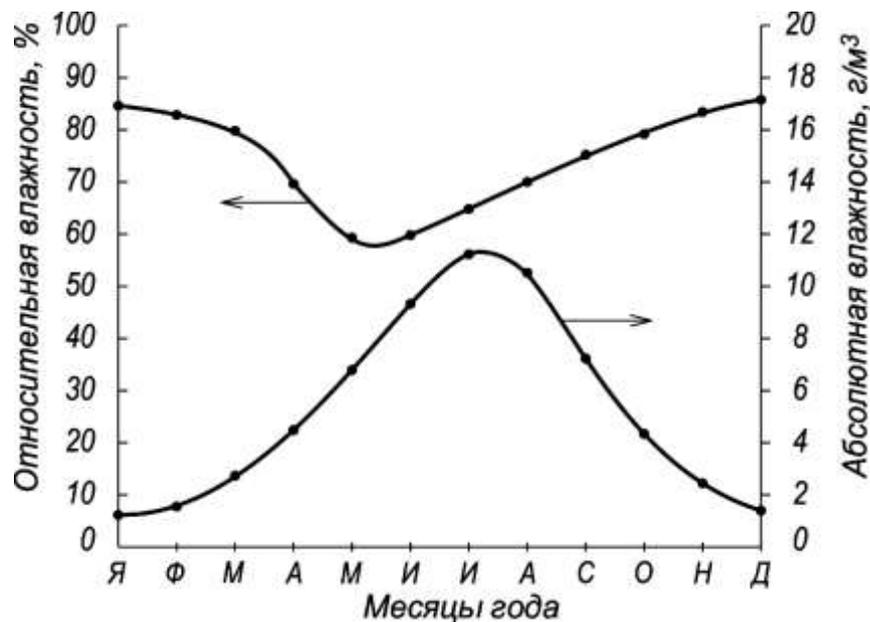


Рис. 2.3. Относительная (%) и абсолютная (г/м³) влажность наружного воздуха в Казани

Пример 2.2. Определить относительную влажность воздуха в помещении в зимний период при нормальном воздухообмене.

Исходные данные: наружный воздух $t_H = -20^\circ\text{C}$, $a = 0,9\text{ г/м}^3$; внутренний воздух $t_B = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$, при этих условиях $a = 8,65\text{ г/м}^3$, $A = 17,3\text{ г/м}^3$.

Решение. При поступлении в помещение 1 м^3 наружного воздуха с абсолютной влажностью $a=0,9\text{ г/м}^3$ он смешивается с внутренним воздухом с влажностью $a=8,65\text{ г/м}^3$. Получим 2 м^3 воздуха с влажностью $0,9+8,65 = 9,55\text{ г/м}^3$, что в пересчете на 1 м^3 дает $9,55/2=4,77\text{ г/м}^3$.

Относительная влажность «смеси» воздуха составит:

$$\varphi = (4,77/17,3) \cdot 100\% = 27,5\% .$$

Проведенный анализ влажного воздуха позволил установить, что основными параметрами, которые определяют закономерности конденсации водяного пара, являются: температура воздуха $t, ^\circ\text{C}$, давление насыщения $E, \text{Па}$ и парциальное давление водяного пара $e, \text{Па}$. Конденсация водяных паров начинается при определенной температуре воздуха t , при которой возникает равенство $E = e$, то есть относительная влажность воздуха $\varphi = 100\%$.

В ограждающих конструкциях эти закономерности проявляются при построении распределений t, E и e в поперечном сечении ограждения. Пересечение распределений E с e укажет на конденсацию водяного пара и расположе-

ние плоскости конденсации. Однако расположение распределений E и e по сечению ограждения и вероятность их пересечения в значительной степени определяются величиной расчетной температуры наружного воздуха t_H , поскольку температура воздуха в помещении t_B практически постоянная.

Поиск закономерностей конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях представлен в последующих разделах пособия.

2.2. Графоаналитический метод Фокина

Неконтролируемая конденсация водяных паров в ограждающих конструкциях может критически изменить их эксплуатационные свойства. В связи с этим исследованию закономерностей конденсации водяного пара уделяется повышенное внимание.

Наибольшее распространение в проектной практике получил графоаналитический метод Фокина [11]. Метод прост, физически понятен и графически нагляден. Суть метода заключается в построении распределений по сечению ограждения: температуры τ_i , давления насыщения водяного пара E_i и парциального давления водяного пара e_i . Пересечение распределений E_i и e_i будет указывать на конденсацию водяного пара и местоположение плоскости конденсации на сечении ограждения. При этом распределение температуры наносится на сечение ограждения от внутреннего воздуха до наружного, а распределения E и e – от внутренней поверхности ограждения до наружной. При этом давления насыщения E_B и E_H , а также парциальные давления водяного пара e_B и e_H , определенные для воздуха, переносятся на поверхности ограждения. То есть сопротивления влагообмену у поверхностей ограждения метод Фокина не учитывает.

Метод Фокина разработан для стационарных температурно-влажностных условий теплопередачи. Условия теплопередачи через ограждающие конструкции в зимний период с некоторыми допущениями можно считать стационарными по двум причинам. Во-первых, параметры микроклимата помещений остаются неизменными весь отопительный период. Во-вторых, параметры климата местности за три зимних месяца, то есть в месяцы с наиболее интенсивным переносом водяного пара через ограждение, изменяются незначительно, что представлено для климатических условий Москвы и Казани в таблице 2.2.

Параметры климата местности за три зимних месяца

Город	Параметры климата, среднемесячные	Зимние месяцы		
		декабрь	январь	февраль
Москва	$t_H, ^\circ\text{C}$	-5,6	-7,8	-7,1
	$e_H, \text{Па}$	360	280	290
	$\varphi_H, \%$	85	84	81
Казань	$t_H, ^\circ\text{C}$	-8,9	-11,6	-10,9
	$e_H, \text{Па}$	280	210	220
	$\varphi_H, \%$	85	84	81

Из таблицы 2.2 видно, что температура наружного воздуха t_H изменяется от месяца к месяцу на 1,5–2,0 °С, упругость водяного пара $e_H, \text{Па}$, — на 10–80 Па, а относительная влажность воздуха φ_H — на 1–3%. Такие изменения климатических параметров практически не изменят стационарности процесса.

Для использования метода Фокина требуются исходные данные.

- 1) Параметры ограждающей конструкции (толщина материальных слоев δ и свойства их материалов (ρ_0, λ, μ))
- 2) Параметры микроклимата помещения t_B, φ_B, E_B, e_B
- 3) Параметры климата места строительства t_H, φ_H, E_H, e_H .

Расчет τ_i, E_i, e_i проводится по стыкам материальных слоев. При большой толщине слоя или в однослойных ограждающих конструкциях намечают расположение дополнительных расчетных сечений.

Температура τ_i и парциальное давление водяного пара e_i по расчетным сечениям определяются по формулам:

$$\tau_i = t_6 - \frac{t_6 - t_H}{R_{\text{то}}} \cdot (R_{\text{тв}} + R_{\text{ти}}), \quad (2.2)$$

$$e_i = e_B - \frac{e_6 - e_H}{R_{\text{по}}} \cdot R_{\text{пи}}, \quad (2.3)$$

где $R_{\text{ти}}$ и $R_{\text{пи}}$ — соответственно, сопротивления теплопередаче и паропроницанию от внутренней поверхности до сечения i .

Давление насыщения водяного пара по расчетным сечениям E_i определяется по формуле (2.4) или по справочным таблицам, на основании температур τ_i в расчетных сечениях.

$$E_i = 1,84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273+t}\right). \quad (2.4)$$

Пример 2.3. По методу Фокина построить распределения температуры, парциального давления и давления насыщения водяного пара по сечению ограждающей конструкции. Сделать вывод о наличии или отсутствии конденсации водяного пара в ограждении.

Параметры ограждения. Однослойная кирпичная стена толщиной $\delta = 0,77\text{ м}$ (в три кирпича), коэффициент теплопроводности кладки $\lambda = 0,7\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$, коэффициент паропроницаемости кладки $\mu = 0,11\text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$. Для построения распределений τ_i, E_i, e_i ограждение разделено на пять слоев по $0,154\text{ м}$. Расчетная схема ограждения приведена на рисунке 2.4.

Условия эксплуатации. Микроклимат помещения:

$$t_{\text{В}} = 20^\circ\text{С}, \varphi_{\text{В}} = 55\%, E_{\text{В}} = 2338\text{ Па}, e_{\text{В}} = (\varphi_{\text{В}} \cdot E_{\text{В}}) / 100 = (55 \cdot 2338) / 100 = 1286\text{ Па}.$$

Климат местности:

$$t_{\text{Н}} = -10,2^\circ\text{С}, \varphi_{\text{Н}} = 84\%, E_{\text{Н}} = 260\text{ Па}, e_{\text{Н}} = (\varphi_{\text{Н}} \cdot E_{\text{Н}}) / 100 = (84 \cdot 260) / 100 = 218\text{ Па}.$$

Расчетные сечения

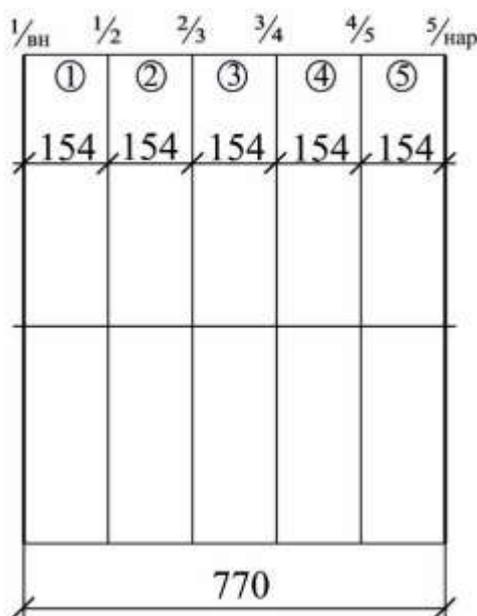


Рис. 2.4. Расчетная схема однослойной ограждающей конструкции

Решение. Определение теплотехнических параметров ограждения.

Сопротивление паропроницанию стены и условного слоя:

$$R_{\text{ПК}} = \delta / \mu = 0,77 / 0,11 = 7 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}; R_{\text{III}} = 0,154 / 0,11 = 1,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}.$$

Сопротивление теплопередаче стены условного слоя:

$$R_{TO} = R_{TB} + \frac{\delta}{\lambda} + R_{TH} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,77}{0,7} + \frac{1}{23} = 0,11 + 1,1 + 0,04 = 1,25 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}$$

$$R_{Ti} = 0,154 / 0,7 = 0,22 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}$$

где $R_{TB} = 1/\alpha_B = 1/8,7 = 0,11 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}$, $R_{TH} = 1/\alpha_H = 1/23 = 0,04 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}$.

Определение температур и соответствующих им значений давлений насыщения водяного пара по сечениям ограждения:

Внутренняя поверхность:

$$\tau_{\epsilon} = t_{\epsilon} - \frac{t_{\epsilon} - t_H}{R_{TO}} \cdot R_{TB} = 20 - \frac{20 - (-10,2)}{1,25} \cdot 0,11 = 17,3^{\circ}\text{C}$$

Сечение 1/2:

$$\tau_{1/2} = t_{\epsilon} - \frac{t_{\epsilon} - t_H}{R_{TO}} \cdot (R_{TB} + R_{Ti}) = 20 - \frac{20 - (-10,2)}{1,25} \cdot (0,11 + 0,22) = 12^{\circ}\text{C}, E_{1/2} = 1403 \text{ Па}$$

Сечение 2/3:

$$\tau_{2/3} = t_{\epsilon} - \frac{t_{\epsilon} - t_H}{R_{TO}} \cdot (R_{TB} + 2 \cdot R_{Ti}) = 20 - \frac{20 - (-10,2)}{1,25} \cdot (0,11 + 2 \cdot 0,22) = 6,7^{\circ}\text{C}, E_{2/3} = 981 \text{ Па}$$

Сечение 3/4:

$$\tau_{3/4} = 1,3^{\circ}\text{C}, E_{3/4} = 671 \text{ Па}$$

Сечение 4/5:

$$\tau_{4/5} = -3,9^{\circ}\text{C}, E_{4/5} = 441 \text{ Па}$$

Наружная поверхность:

$$\tau_H = t_{\epsilon} - \frac{t_{\epsilon} - t_H}{R_{TO}} \cdot (R_{TO} - R_{TH}) = 20 - \frac{20 - (-10,2)}{1,25} \cdot (1,25 - 0,04) = -9,3^{\circ}\text{C}$$

Определение парциальных давлений водяного пара по сечению ограждения

Сечение 1/2:

$$e_{1/2} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{ПК}} \cdot R_{Pi} = 1286 - \frac{1286 - 218}{7} \cdot 1,4 = 1072 \text{ Па}$$

Сечение 2/3:

$$e_{2/3} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{ПК}} \cdot 2R_{Pi} = 1286 - \frac{1286 - 218}{7} \cdot (2 \cdot 1,4) = 858 \text{ Па}$$

Сечение 3/4:

$$e_{3/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{ПК}} \cdot 3R_{Pi} = 1286 - \frac{1286 - 218}{7} \cdot (3 \cdot 1,4) = 645 \text{ Па}$$

$$\text{Сечение 4/5: } e_{4/5} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{ПК}} \cdot R_{Pi} = 1286 - \frac{1286 - 218}{7} \cdot (4 \cdot 1,4) = 431 \text{ Па}$$

Полученные значения температур и давлений водяного пара переносят на сечение ограждения (рис. 2.5).

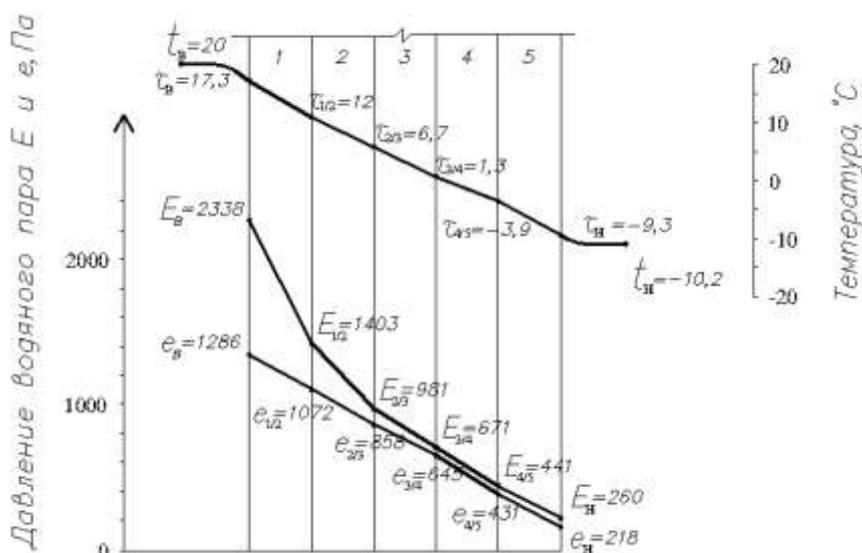


Рис. 2.5. Распределение температур (t и τ), действительных (e) и максимальных (E) давлений водяного пара по сечению ограждения при $t_H = -10,2^\circ\text{C}$. 1, 2, 3,... — условные слои ограждающей конструкции

Из рисунка видно, что распределения E и e не пересекаются, следовательно, при температуре наружного воздуха $t_H = -10,2^\circ\text{C}$ и выше конденсации водяного пара в ограждении не происходит.

Из рисунка 2.5 также можно заметить, что распределение E и e в «холодной половине» ограждения находятся в непосредственной близости, и в сечении 3/4 различаются на 26 Па, а в сечении 4/5 — на 10 Па. Можно предположить, что при понижении температуры наружного воздуха на несколько градусов в рассматриваемой ограждающей конструкции может возникнуть конденсация водяного пара.

Пример 2.4. По методу Фокина построить распределения температур, парциального давления и давления насыщения водяного пара по сечению ограждающей конструкции, описанной в примере 2.3, при температуре наружного воздуха $t_H = -15^\circ\text{C}$ (средняя температура холодного периода, обеспеченного 0,94 в Москве).

Условия эксплуатации. Микроклимат помещения:

$$t_B = 20^\circ\text{C}, \varphi_B = 55\%, E_B = 2338 \text{ Па}, e_B = (\varphi_B \cdot E_B) / 100 = (55 \cdot 2338) / 100 = 1286 \text{ Па}.$$

Климат местности:

$$t_H = -15^\circ\text{C}, \varphi_H = 84\%, E_H = 165 \text{ Па}, e_H = (\varphi_H \cdot E_H) / 100 = (84 \cdot 165) / 100 = 139 \text{ Па}.$$

Решение:

Определение температур и соответствующих им значений давлений насыщения водяного пара по сечению ограждения:

Внутренняя поверхность:

$$\tau_{\text{в}} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - (-15)}{1,25} \cdot 0,11 = 16,9^{\circ}\text{C} .$$

Сечение 1/2:

$$\tau_{1/2} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot (R_{\text{ТВ}} + R_{\text{ТІ}}) = 20 - \frac{20 - (-15)}{1,25} \cdot (0,11 + 0,22) = 10,7^{\circ}\text{C}, E_{1/2} = 1287 \text{ Па}$$

Сечение 2/3:

$$\tau_{2/3} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot (R_{\text{ТВ}} + 2R_{\text{ТІ}}) = 20 - \frac{20 - (-15)}{1,25} \cdot (0,11 + 0,44) = 4,6^{\circ}\text{C}, E_{2/3} = 848 \text{ Па}$$

Сечение 3/4:

$$\tau_{3/4} = -1,56^{\circ}\text{C}, E_{3/4} = 539 \text{ Па}$$

Сечение 4/5:

$$\tau_{4/5} = -7,7^{\circ}\text{C}, E_{4/5} = 318 \text{ Па}.$$

Наружная поверхность:

$$\tau_{\text{н}} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot (R_{\text{ТО}} - R_{\text{ТН}}) = 20 - \frac{20 - (-15)}{1,25} \cdot (1,25 - 0,11) = -13,9^{\circ}\text{C} .$$

Определение парциальных давлений водяного пара по сечению ограждения

Сечение 1/2:

$$e_{1/2} = e_{\text{в}} - \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{н}}}{R_{\text{ПК}}} \cdot R_{\text{ПІ}} = 1286 - \frac{1286 - 139}{7} \cdot 1,4 = 1057 \text{ Па}$$

Сечение 2/3:

$$e_{2/3} = e_{\text{в}} - \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{н}}}{R_{\text{ПК}}} \cdot 2R_{\text{ПІ}} = 1286 - \frac{1286 - 139}{7} \cdot (2 \cdot 1,4) = 827 \text{ Па}$$

Сечение 3/4: $e_{3/4} = 590 \text{ Па}$

Сечение 4/5: $e_{4/5} = 368 \text{ Па} .$

Полученные значения температур и давлений водяного пара переносят на сечение ограждения (рис. 2.6).

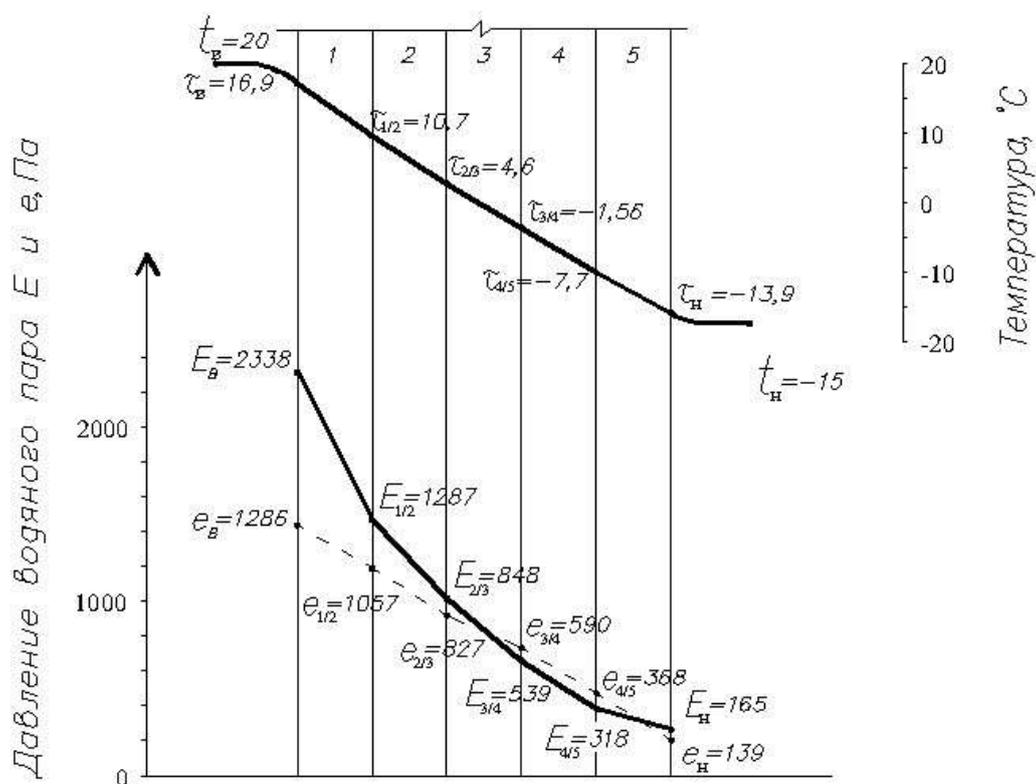


Рис. 2.6. Распределение температур (t и τ), действительных (e) и максимальных (E) давлений водяного пара по сечению ограждения при $t_H = -15^\circ\text{C}$. 1, 2, 3, ... – условные слои ограждающей конструкции

Из рисунка 2.6 видно, что в сечениях 3/4 и 4/5 величины максимальной упругости водяного пара E оказались меньше парциальных давлений водяного пара e , что невозможно с физической точки зрения, следовательно, в сечениях 3/4 и 4/5 будет конденсация водяного пара.

Результаты расчетов, представленных в примерах 2.3 и 2.4, показывают, что метод Фокина позволяет определить лишь наличие или отсутствие конденсации водяного пара при той или иной температуре наружного воздуха. Метод не позволяет оценить возможности конструктивного решения ограждений противостоять переувлажнению в климатических условиях места строительства.

2.3. Неточности и неопределенности метода Фокина

Метод Фокина широко используется в проектной и исследовательской практике за его простоту и наглядность. Однако метод имеет ряд неточностей и неопределенностей, которые не позволяют объективно оценить конструктивные решения ограждений с точки зрения ненакопления в них конденсированной влаги [15,16].

1) Метод не учитывает сопротивления влагообмену у внутренней $R_{\text{ПВ}}$ и наружной $R_{\text{ПН}}$ поверхностей ограждения, а значения $e_{\text{В}}$ и $e_{\text{Н}}$, определенные для воздуха, переносит на поверхности ограждения ($e_{\text{ВП}} = e_{\text{В}}$ и $e_{\text{НП}} = e_{\text{Н}}$), что не может не вносить ошибки в расчеты.

2) Метод переносит на поверхности ограждений значения давлений насыщения водяного пара, определенные для воздуха $E_{\text{В}}$ и $E_{\text{Н}}$, то есть принимает: $E_{\text{ВП}} = E_{\text{В}}$ и $E_{\text{НП}} = E_{\text{Н}}$. При этом не учитывается, что значения $E_{\text{ВП}}$ и $E_{\text{НП}}$ легко определяются по температурам поверхности ограждений $\tau_{\text{В}}$ и $\tau_{\text{Н}}$.

3) В методе не регламентируется расчетная температура наружного воздуха $t_{\text{Н}}$, поэтому авторы используют различные расчетные температуры:

- Среднегодовую температуру (+4,2 °С)
- Среднюю температуру периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами (-7,8°С)
- Среднюю температуру наиболее холодного месяца (-11,6°С)
- Среднюю температуру наиболее холодного периода обеспеченностью 0,94 (-16°С);
- Среднюю температуру наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (-31°С).

В скобках указаны значения температур для Казани. Можно видеть, что диапазон температур составляет десятки градусов, в связи с чем, результаты расчета и выводы о наличии или отсутствии конденсации могут оказаться диаметрально противоположными.

3. НОВЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

На стадии проектирования ограждающих конструкций возникает необходимость оценки их переувлажнения за счет конденсации водяных паров в заданных климатических условиях. Существующие методы СП 50 и СП 345 имеют неопределенности и не учитывают ряд значимых факторов. Метод Фокина решает лишь узкие задачи и также непригоден для всесторонней оценки.

Возникшая потребность реализована в новом методе анализа закономерностей конденсации водяного пара, который учитывает как конструктивные решения ограждений, так и климатические условия места строительства [20,21]. В основе разработанного метода лежит новый параметр – **температура начала конденсации $t_{нк}$** , который является характеристикой конструктивного решения ограждений и использованных материалов. Как будет показано далее, каждая ограждающая конструкция имеет собственную температуру начала конденсации, которая численно равна температуре наружного воздуха t_n и делит температурную шкалу места строительства на две части. При t_n выше $t_{нк}$ в данной ограждающей конструкции не происходит конденсация водяного пара, а при t_n ниже $t_{нк}$ в ограждении начинается конденсация водяного пара.

3.1. Определение сопротивлений влагообмену у поверхностей ограждения

Процессы тепло- и влагообмена у поверхностей ограждающих конструкций требуют специального учета, потому что они значительно влияют на оценку общих теплопотерь зданий и влажностного состояния ограждающих конструкций. Сопротивления теплообмену у внутренней $R_{ТВ} = 1/\alpha_B$ и наружной $R_{ТН} = 1/\alpha_H$ поверхностей ограждающих конструкций всесторонне исследованы, а коэффициенты теплообмена у внутренней α_B и наружной α_H поверхностей ограждений включены в нормативный документ СП 50.

Попытки регламентировать сопротивления влагообмену у внутренней и наружной поверхностей ограждения описаны в ряде работ [17, 18], однако до настоящего времени эти исследования не доведены до инженерных методов расчета и не введены в нормативные документы.

Так, Ильинским В.М. [18] предложено определять $R_{ПВ}$ в зависимости от относительной влажности воздуха в помещении φ_B , если перепад температур между воздухом помещения t_B и поверхностью τ_B находится в пределах 2–5°C:

$$R_{ПВ} = \left(1 - \frac{\varphi_B}{100} \right). \quad (3.1)$$

Однако размерность $R_{пв}$ оказывается неопределенной. В этой же работе предложено определять $R_{пв}$ из анализа термодинамических условий на поверхности ограждения:

$$R_{пв} = RT \cdot \ln \frac{E}{e} \cdot \frac{1}{\alpha_v}, \quad (3.2)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – температура, К; E – давление насыщения водяного пара; e – равновесное давление при рассматриваемой влажности материала; α_v – коэффициент теплообмена на поверхности.

В работе [18] приведен расчет по формуле (3.2) при температуре поверхности $\tau_v = 18^\circ C$. Для различных характеристик влажности помещений (от сухих до мокрых) и на поверхности ограждений (от 25 до 100%) получено, что величина $R_{пв}$ находится в интервале от 0,02 до 0,18 $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$.

Однако отсутствие метода оценки «равновесного давления при рассматриваемой влажности материалов» – затрудняет использование формулы (3.2).

Богословским В.Н. [17] показано, что поток водяного пара, проходящего через пограничный слой воздуха около поверхности, соответствует интенсивности влагообмена поверхности с воздухом G , $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

$$G = \beta_e \cdot (e_v - e_{вп}), \quad (3.3)$$

где β_e – коэффициент влагообмена на поверхности, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; e_v и $e_{вп}$ – парциальные давления водяного пара в воздухе помещения и на поверхности.

Величина β_e зависит от температуры, влажности, подвижности воздуха в помещении и температуры поверхности:

$$\beta_e = 42,9 \Delta t^{1/3} \cdot \Delta e^{2/5}, \quad (3.4)$$

где Δt и Δe – разности температур и парциальных давлений водяного пара в воздухе помещений и на поверхности $\Delta t = (t_v - \tau_v)$, $\Delta e = (e_v - e_{вп})$.

Сопротивление влагообмену $R_{пв}$ является обратной величиной коэффициента влагообмена β_e :

$$R_{пв} = 1/\beta_e, (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}. \quad (3.5)$$

Формулу (3.3) можно переписать с учетом $R_{пв}$ и получить выражение для $R_{пв}$:

$$G = \frac{e_v - e_{вп}}{R_{вп}}, \text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3.6)$$

$$R_{пв} = \frac{e_v - e_{вп}}{G}, (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}. \quad (3.7)$$

Однако понятие $e_{вп}$ остается затруднительным.

Проведенный обзор показал, что до настоящего времени не создано официального метода определения сопротивлений влагопереходу у поверх-

ностей ограждения $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$. Очевидно, по этой причине в отечественной и зарубежной строительной физике принято не учитывать $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$ при определении сопротивления паропрооницанию ограждающих конструкций. В качестве обоснования такого «неучета» указывается на малость значений $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$ по сравнению с сопротивлением паропрооницанию конструкции ограждения $R_{ПК}$.

Такой подход нельзя считать научно обоснованным хотя бы потому, что сопротивления теплообмену у поверхностей ограждения также весьма малы по сравнению с сопротивлением теплопередаче конструкции ограждения $R_{ТК}$, но учет этих сопротивлений введен в нормы проектирования и является обязательным.

Неучет $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$ вносит неопределенность в установление закономерностей конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях, когда давление насыщения E_B и парциальное давление водяного пара e_B в воздухе помещения переносятся на поверхность ограждения, то есть приравняются: $E_{ВП} = E_B$ и $e_{ВП} = e_B$. Аналогично приравняются $E_{НП} = E_H$ и $e_{НП} = e_H$.

При таком подходе не учитывается распределение температур по сечению ограждающей конструкции, когда температуры на поверхностях ограждений τ_B и τ_H отличаются от температуры в воздухе помещения t_B и в наружном воздухе t_H , следовательно, не учитывается физическая зависимость E от t (рис. 2.1), при которой $E_{ВП} \neq E_B$ и $E_{НП} \neq E_H$. Например, при разности температур $(t_B - \tau_B)$ в 2–4 °С разница между E_B и $E_{ВП}$ составляет 15–20%, что существенно.

Неучет сопротивления влагообмену у поверхностей ограждения $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$ отражается на результатах расчета, потому что при расчете e_i по формуле (2.3) общее сопротивление паропрооницанию $R_{ПО} = R_{ПВ} + R_{ПК} + R_{ПН}$ заменяется на сопротивление паропрооницанию только конструктивных слоев ограждения $R_{ПК}$. В результате, значения e_i по сечениям ограждения оказываются завышенными на 30–150 Па, что может привести к ошибочным выводам.

Разработка метода

В основу метода определения $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$ положен принцип равенства потоков водяного пара по всем слоям ограждающих конструкций от внутреннего воздуха до наружного:

$$G = \frac{e_B - e_H}{R_{ПО}} = \frac{e_B - e_{ВП}}{R_{ПВ}} = \frac{e_{ВП} - e_{НП}}{R_{ПК}} = \frac{e_{НП} - e_H}{R_{ПН}}, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (3.8)$$

по аналогии с равенством тепловых потоков по сечениям ограждения:

$$Q = \frac{t_B - t_H}{R_{ТО}} = \frac{t_B - \tau_B}{R_{ТВ}} = \frac{\tau_B - \tau_H}{R_{ТК}} = \frac{\tau_H - t_H}{R_{ТН}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}). \quad (3.9)$$

Параметры формул (3.8) и (3.9) приведены на рисунке 3.1.

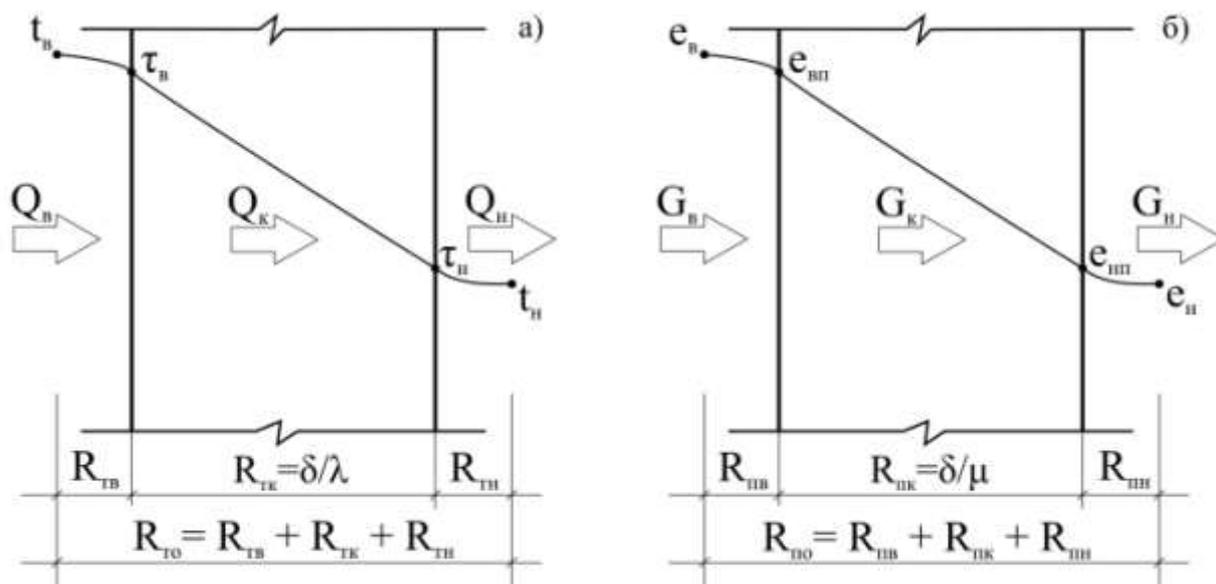


Рис. 3.1. Схема переноса тепла (а) и водяного пара (б) через однослойную ограждающую конструкцию

Следует отметить, что равенство потоков водяного пара по слоям ограждающих конструкций соблюдается **только при отсутствии его конденсации**, которая в значительной степени зависит от температуры наружного воздуха.

Как будет показано в последующих разделах, для каждой ограждающей конструкции существует своя граница температуры наружного воздуха, ниже которой возникает конденсация водяных паров. Многочисленные расчеты показывают, что при среднегодовой температуре наружного воздуха конденсация водяных паров отсутствует в подавляющем числе случаев. В связи с этим среднегодовая температура наружного воздуха места строительства принимается за расчетную температуру при определении $R_{ив}$ и $R_{пн}$.

Исходными данными для расчета $R_{ив}$ и $R_{пн}$ являются параметры ограждающих конструкций (δ_i, λ_i и μ_i материальных слоев), микроклимат проектируемого помещения $t_в$ и $\varphi_в$ и климатические параметры места строительства: среднегодовая температура наружного воздуха $t_н$ и относительная влажность наружного воздуха $\varphi_н$, которая соответствует величине среднегодовой температуры.

Для определения $\varphi_н$ по величине $t_н$ можно воспользоваться формулой (3.10), которая получена статистической обработкой среднемесячных значений $t_н$ и $\varphi_н$ по нескольким десяткам населенных пунктов [3]:

$$\varphi_i = -0,0118 \cdot t_н^2 - 0,33 \cdot t_н + 78,25. \quad (3.10)$$

В таблице 3.1 приведен расчет по формуле (3.10) для некоторых температур наружного воздуха $t_н$.

Зависимость φ_H от t_H для некоторых температур

$t_H, ^\circ\text{C}$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
$\varphi_H, \%$	78	79	80	80	80	79	78	76	74

Последовательность определения $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$ [19]:

Определяется общее сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_{ТО}$:

$$R_{ТО} = R_{ТВ} + R_{ТК} + R_{ТН} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_H}, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}. \quad (3.11)$$

Определяется сопротивление паропроницанию конструктивной части ограждения $R_{ПК}$ по формуле:

$$R_{ПК} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}, (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}, \quad (3.12)$$

где n – количество материальных слоев.

Определяются температуры на внутренней τ_B и наружной τ_H поверхностях ограждения по формуле:

$$\tau_x = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{ТО}} \cdot R_{ТХ}, \quad (3.13)$$

где $R_{ТХ} = R_{ТВ}$ при определении τ_B и $R_{ТХ} = (R_{ТВ} + R_{ТК})$ при определении τ_H .

По значениям температур t_B, t_H, τ_B и τ_H определяются значения давлений насыщения водяного пара $E_B, E_H, E_{ВП}$ и $E_{НП}$ по формуле (2.4):

$$E_i = 1,84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273+t}\right), \text{Па},$$

или по справочным таблицам.

Определяются значения парциальных давлений водяного пара в воздухе помещения e_B и в наружном воздухе e_H по известной формуле относительной влажности воздуха (2.1):

$$e = (\varphi \cdot E)/100, \text{Па}.$$

Ключевой особенностью нового метода является определение парциальных давлений водяного пара на внутренней $e_{ВП}$ и наружной $e_{НП}$ поверхностях ограждения.

Перенос водяного пара от воздуха помещения к внутренней поверхности ограждения будет возможен, если величина $e_{ВП}$ будет ниже e_B , а выход водяного пара из ограждения в наружный воздух будет возможен, если величина $e_{НП}$ будет выше e_H . Эти условия будут выполняться, если для определения $e_{ВП}$ и $e_{НП}$ использовать значения $E_{ВП}$, которые ниже E_B в соответствии с раз-

ностью температур t_B и τ_B , а также использовать значения $E_{\text{нп}}$, которые выше $E_{\text{н}}$ в соответствии с разностью температур $\tau_{\text{н}}$ и $t_{\text{н}}$. При этом используется известная формула относительной влажности воздуха (2.1):

$$e_{\text{вп}} = (\varphi_{\text{в}} \cdot E_{\text{вп}}) / 100 \text{ Па},$$

$$e_{\text{нп}} = (\varphi_{\text{н}} \cdot E_{\text{нп}}) / 100 \text{ Па}.$$

Значения $e_{\text{вп}}$ и $e_{\text{нп}}$ позволяют оценить величину потока водяного пара, который проходит через конструктивную часть ограждения:

$$G_{\text{к}} = \frac{e_{\text{вп}} - e_{\text{нп}}}{R_{\text{пк}}}, \text{ мг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3.14)$$

При отсутствии конденсации водяного пара величина потока равна $G_{\text{к}}$, который проходит через все участки ограждения, от внутреннего воздуха до наружного, что позволяет определить сопротивления влагообмену у внутренней и наружной поверхности ограждения.

$$R_{\text{пв}} = \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{вп}}}{G_{\text{к}}}, (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}, \quad (3.15)$$

$$R_{\text{пн}} = \frac{e_{\text{нп}} - e_{\text{н}}}{G_{\text{к}}}, (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}. \quad (3.16)$$

Общее сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции определится по формуле:

$$R_{\text{по}} = R_{\text{пв}} + R_{\text{пк}} + R_{\text{пн}}. \quad (3.17)$$

Пример 3.1. У однослойной ограждающей конструкции определить сопротивления влагообмену у внутренней и наружной поверхности, а также общее сопротивление паропрооницанию.

Исходные данные:

Однослойное ограждение из керамического кирпича $\delta=64 \text{ см}$, $\rho_0=1800 \text{ кг/м}^3$, $\lambda=0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, $\mu=0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$

Параметры микроклимата помещения: $t_{\text{в}}=20 \text{ °C}$, $\varphi_{\text{в}}=50 \%$, $E_{\text{в}}=2338 \text{ Па}$, $e_{\text{в}}=0,5 \cdot 2338=1169 \text{ Па}$

Параметры климата: $t_{\text{в}}=+4,2 \text{ °C}$ (среднегодовая температура для Казани), $\varphi_{\text{в}}=76 \%$, $E_{\text{в}}=825 \text{ Па}$, $e_{\text{в}}=0,76 \cdot 825=627 \text{ Па}$

Решение. Общее сопротивление теплопередаче $R_{\text{то}}$:

$$R_{\text{то}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,64}{0,7} + \frac{1}{23} = 1,06 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}.$$

Сопротивление паропрооницанию конструктивной части ограждения $R_{\text{пк}}$:

$$R_{\text{пк}} = \frac{\delta}{\mu} = \frac{0,64}{0,11} = 5,82 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}.$$

Температуры на внутренней τ_B и наружной τ_H поверхностях ограждения:

$$\tau_B = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{TO}} \cdot R_{TB} = 20 - \frac{20 - 4,2}{1,06} \cdot 0,11 = 18,4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_{ВП} = 2115 \text{ Па},$$

$$\tau_H = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{TO}} \cdot (R_{TO} - R_{TH}) = 20 - \frac{20 - 4,2}{1,06} \cdot \left(1,06 - \frac{1}{23}\right) = 4,8 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_{НП} = 860 \text{ Па}.$$

Парциальное давление водяных паров на внутренней $e_{ВП}$ и наружной $e_{НП}$ поверхностях ограждения:

$$e_{ВП} = (\varphi_B \cdot E_{ВП}) / 100 = (50 \cdot 2115) / 100 = 1057 \text{ Па},$$

$$e_{НП} = (\varphi_H \cdot E_{НП}) / 100 = (76 \cdot 860) / 100 = 654 \text{ Па}.$$

Поток водяного пара, проходящего от внутренней до наружной поверхности ограждения:

$$G_K = \frac{e_{ВП} - e_{НП}}{R_{ПК}} = \frac{1057 - 654}{5,82} = 69 \text{ мг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Сопротивления влагообмену у внутренней $R_{ПВ}$ и наружной $R_{ПН}$ поверхностей:

$$R_{ПВ} = \frac{e_B - e_{ВП}}{G_K} = \frac{1169 - 1057}{69} = 1,62 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)} / \text{мг},$$

$$R_{ПН} = \frac{e_{НП} - e_H}{G_K} = \frac{654 - 627}{69} = 0,39 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)} / \text{мг}.$$

Общее сопротивление паропроницанию ограждения:

$$R_{ПО} = R_{ПВ} + R_{ПК} + R_{ПН} = 1,62 + 5,82 + 0,39 = 7,83 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)} / \text{мг}.$$

Пример 3.2. У многослойной ограждающей конструкции определить сопротивления влагообмену у внутренней $R_{ПВ}$ и наружной $R_{ПН}$ поверхностей, а также общее сопротивление паропроницанию $R_{ПО}$.

Исходные данные:

1) Внутренний слой (конструкционный) – керамический кирпич $\delta_1 = 38 \text{ см}$, $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_1 = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$, $\mu_1 = 0,11 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$

2) Теплоизоляционный слой – минераловатные плиты $\delta_2 = 10 \text{ см}$, $\rho_0 = 100 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_2 = 0,042 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$, $\mu_2 = 0,32 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$

3) Облицовочный слой – наружная штукатурка на основе сухой смеси Ceresit СТ-190 $\delta_3 = 10 \text{ мм}$, $\lambda_3 = 0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$, $\mu_3 = 0,02 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

Параметры микроклимата помещения: $t_B = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\varphi_B = 50 \%$, $E_B = 2338 \text{ Па}$,

$$e_B = 0,5 \cdot 2338 = 1169 \text{ Па}.$$

Параметры климата: $t_H = +4,2^\circ\text{C}$ (среднегодовая температура для Казани),

$$\varphi_H = 76\%, \quad E_H = 825 \text{ Па}, \quad e_H = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па}.$$

Решение. Общее сопротивление теплопередаче $R_{\text{ТО}}$:

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_H} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{0,1}{0,042} + \frac{0,01}{0,12} + \frac{1}{23} = 3,19 \left(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \right) / \text{Вт}.$$

Сопротивление паропроницанию конструктивной части ограждения $R_{\text{ПК}}$:

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = \frac{0,38}{0,11} + \frac{0,01}{0,32} + \frac{0,01}{0,02} = 4,26 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}.$$

Температуры на внутренней τ_B и наружной τ_H поверхностях ограждения:

$$\tau_B = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,19} \cdot 0,11 = 19,4^\circ\text{C}, \quad E_{\text{ВП}} = 2251 \text{ Па}.$$

$$\tau_H = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot (R_{\text{ТО}} - R_{\text{ТН}}) = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,19} \cdot \left(3,19 - \frac{1}{23} \right) = 4,4^\circ\text{C}, \quad E_{\text{НП}} = 836 \text{ Па}.$$

Парциальное давление водяных паров на внутренней $e_{\text{ВП}}$ и наружной $e_{\text{НП}}$ поверхностях ограждения:

$$e_{\text{ВП}} = (\varphi_B \cdot E_{\text{ВП}}) / 100 = (50 \cdot 2251) / 100 = 1125 \text{ Па},$$

$$e_{\text{НП}} = (\varphi_H \cdot E_{\text{НП}}) / 100 = (76 \cdot 836) / 100 = 635 \text{ Па}.$$

Поток водяного пара, проходящего от внутренней до наружной поверхности ограждения:

$$G_K = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1057 - 635}{4,26} = 115 \text{ Мг} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right).$$

Сопротивления влагообмену у внутренней $R_{\text{ПВ}}$ и наружной $R_{\text{ПН}}$ поверхностей:

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_B - e_{\text{ВП}}}{G_K} = \frac{1169 - 1125}{115} = 0,38 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_H}{G_K} = \frac{635 - 627}{115} = 0,07 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}.$$

Общее сопротивление паропроницанию ограждения:

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,38 + 4,26 + 0,07 = 4,7 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}.$$

3.2. Определение температуры начала конденсации

Основной неопределенностью метода Фокина является отсутствие обоснований по выбору расчетной температуры наружного воздуха. Если для расчета используется температура из верхнего ряда температурной шкалы (например, среднегодовая), то с высокой вероятностью конденсация водяных паров не происходит; если из нижнего ряда (например, температура холодной пяти-

дневки), то с высокой вероятностью в ограждении будет формироваться зона конденсации [16].

Естественно предположить, что между крайними значениями температур наружного воздуха существует такое значение температуры, при котором в ограждении начнется конденсация водяного пара и образуется плоскость конденсации.

Рассмотрим распределение τ , E и e в условном ограждении при трех температурах наружного воздуха t_H (рис. 3.2). Величина t_H снижается от рисунка 3.2 а к рисунку 3.2 в. Можно видеть, что на рисунке 3.2 а E и e не пересекаются, следовательно, конденсация водяного пара отсутствует, а на рисунке 3.2 в показано, что образуется зона конденсации. Такой случай рассмотрен в примере 2.3 при $t_H = -10,2^\circ\text{C}$ (среднемесячная температура января для Москвы – конденсация отсутствует – рис. 2.5), а в примере 2.4 при $t_H = -15^\circ\text{C}$ (средняя температура холодного периода обеспеченностью 0,94 – образуется зона конденсации – рис. 2.6).

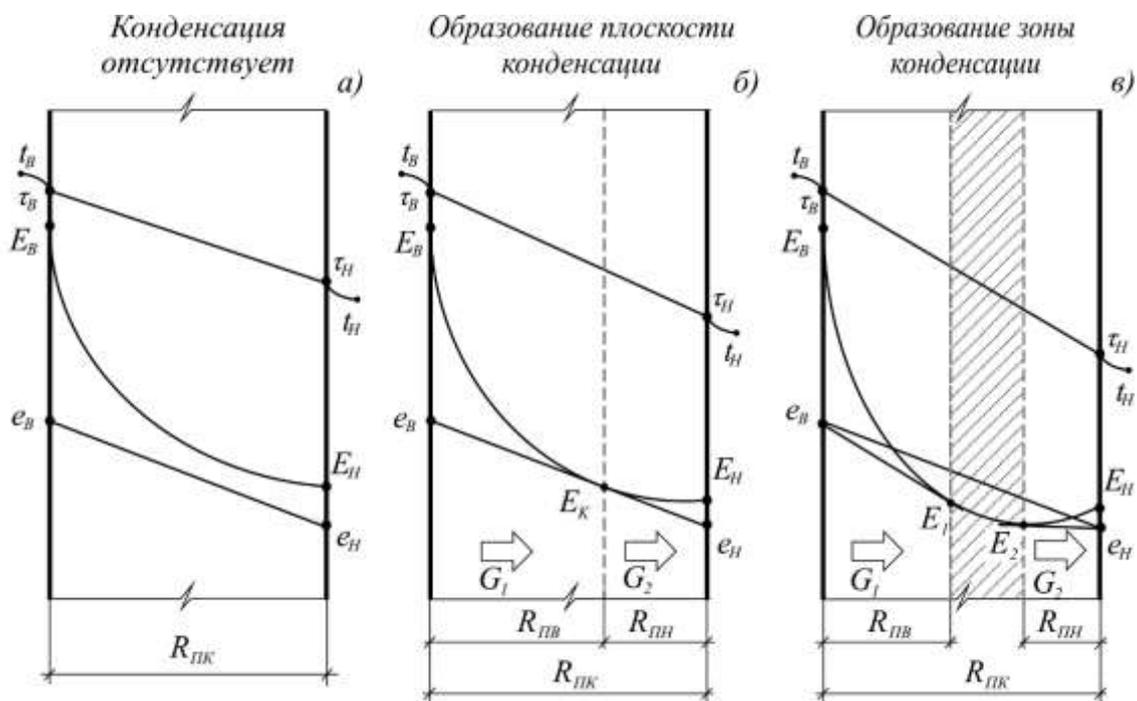


Рис. 3.2. Распределение температуры (τ_x) максимального (E_x) и действительная (e_x) парциального давления водяного пара в однослойной конструкции при трех температурах наружного воздуха (t_H)

Очевидно, что между температурами $-10,2^\circ\text{C}$ и -15°C существует такая температура наружного воздуха, при которой начинается конденсация водяного пара и образуется плоскость конденсации, что будет соответствовать рисунку 3.2 б. **Определение этой температуры наружного воздуха является основной отличительной особенностью нового метода [20–22, 37].**

Температура наружного воздуха, при которой начинается конденсация водяных паров в каком-либо сечении ограждения, является своеобразной границей в температурной шкале. При температуре наружного воздуха выше этой границы конденсация водяного пара в ограждении не происходит, при темпера-

туре наружного воздуха ниже этой границы в ограждении конденсируются водяные пары.

Эта граница в температурной шкале наружного воздуха получила название «Температура начала конденсации, $t_{НК}$ ».

Температура начала конденсации водяного пара в ограждающей конструкции $t_{НК}$ определяется путем расчета и построения зависимости разности давлений $(E - e)$ от температуры наружного воздуха t_H по расчетному сечению. В расчете используются не менее трех значений t_H из температурной шкалы наружного воздуха места строительства. Схема такой зависимости представлена на рисунке 3.3.

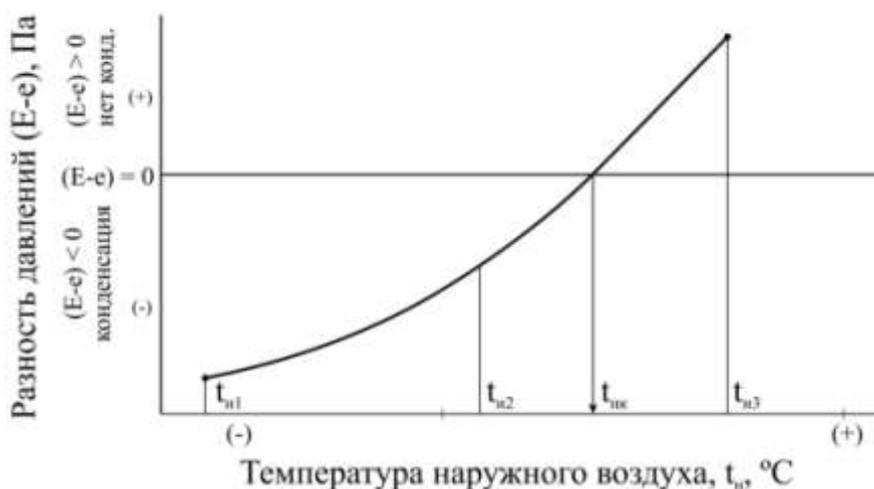


Рис. 3.3. Схема зависимости $(E - e)$ от t_H в расчетном сечении и определение температуры начала конденсации $t_{НК}$ в этом сечении

Из рисунка 3.3 видно, что при определенных значениях t_H в расчетном сечении разность давлений положительная, т.е. $(E - e) > 0$, $\varphi < 100\%$, конденсация водяного пара отсутствует. При других значениях t_H — $(E - e) < 0$, $\varphi = 100\%$, то есть происходит конденсация водяного пара в этом сечении. Граница между этими температурами определяется пересечением графической зависимости $(E - e)$ от t_H с горизонталью $(E - e) = 0$. Это и будет температура начала конденсации водяного пара в расчетном сечении, $t_{НК}$.

Для реализации зависимости $(E - e)$ от t_H следует обосновать расположение расчетного сечения, в котором начнется конденсация водяных паров. Исследование этого вопроса показало, что известные более полувека рекомендации СНиП по строительной теплотехнике [1–8] о расположении плоскости наиболее вероятного увлажнения остаются актуальными в настоящее время и использованы в методе определения температуры начала конденсации. Это наружная поверхность утеплителя для многослойных ограждений и сечение, расположенное на расстоянии $2/3$ толщины ограждения от его внутренней поверхности для однослойных ограждений.

Выбор расчетных температур наружного воздуха должен подчиняться определенным правилам. Во-первых, количество расчетных температур должно обеспечить необходимое количество расчетных точек для графического построения зависимости $(E - e)$ от t_H . Во-вторых, одно значение t_H должно быть достаточно высоким, при нем заведомо будет отсутствовать конденсация водяных паров. Другое значение t_H должно быть достаточно низким, при нем заведомо будет образовываться зона конденсации. Между высоким и низким значениями температуры наружного воздуха должны быть выбраны одно-два значения t_H .

Исследования показали, что наиболее оптимальным является следующее сочетание температур наружного воздуха:

- 1) Среднегодовая температура
- 2) Средняя температура наиболее холодного месяца
- 3) Средняя температура наиболее холодного месяца, уменьшенная на максимальную суточную амплитуду.

Расчет температуры τ , давления насыщения E и парциального давления водяного пара e в расчетном сечении при трех значениях t_H выполняется по известным формулам (2.2), (2.3) и (2.4). Вычисляется разность давлений $(E - e)$ при каждой температуре, а результаты наносятся на график, аналогичный рисунку 3.3.

Пример 3.3. *Определить температуру начала конденсации в трехслойной ограждающей конструкции.*

Исходные данные:

Параметры слоев ограждающей конструкции:

1) Внутренний конструкционный слой – кладка из керамического кирпича $\delta_1 = 0,77$ м, $\rho_0 = 1800$ кг/м³, $\lambda_1 = 0,7$ Вт/(м·°С), $\mu_1 = 0,11$ мг/(м·ч·Па).

2) Теплоизоляционный слой – минераловатные плиты $\delta_2 = 0,1$ м, $\rho_0 = 100$ кг/м³, $\lambda_2 = 0,042$ Вт/(м·°С), $\mu_2 = 0,32$ мг/(м·ч·Па).

3) Наружный облицовочный слой – кладка из керамического кирпича $\delta_3 = 0,12$ м, $\rho_0 = 1800$ кг/м³, $\lambda_3 = 0,7$ Вт/(м·°С), $\mu_3 = 0,11$ мг/(м·ч·Па).

Параметры микроклимата помещения: $t_B = 20$ °С, $\varphi_B = 50$ %, $E_B = 2338$ Па, $e_B = 0,5 \cdot 2338 = 1169$ Па.

Климатические параметры места строительства (Казань):

- 1) Среднегодовая температура наружного воздуха: $t_{H,1} = +4,2$ °С, $\varphi_{H,1} = 76$ %, $E_H = 825$ Па, $e_H = 0,76 \cdot 825 = 627$ Па.

2) Средняя температура наиболее холодного месяца: $t_{H,2} = -11,6^{\circ}\text{C}$,

$$\varphi_{H,2} = 80\%, E_H = 225 \text{ Па}, e_H = 0,8 \cdot 225 = 180 \text{ Па}.$$

3) Средняя температура наиболее холодного месяца, уменьшенная на максимальную суточную амплитуду $t_{H,3} = -11,6 + (-10,2) = -21,8^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{H,3} = 84\%$,

$$E_H = 87 \text{ Па}, e_H = 0,84 \cdot 87 = 73 \text{ Па}.$$

Решение. Расчетная схема трехслойного ограждения представлена на рисунке 3.4. В качестве расчетного сечения принята наружная поверхность утеплителя, сечение 2/3.

Расчет теплотехнических параметров:

$$R_{\text{то}} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_H} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{0,1}{0,042} + \frac{0,12}{0,7} + \frac{1}{23} = 3,24 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{T,3/H} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{0,1}{0,042} + \frac{0,12}{0,7} = 3,2 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{T,2/3} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{0,1}{0,042} = 3,03 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = \frac{0,38}{0,11} + \frac{0,01}{0,32} + \frac{0,12}{0,11} = 4,85 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг} .$$

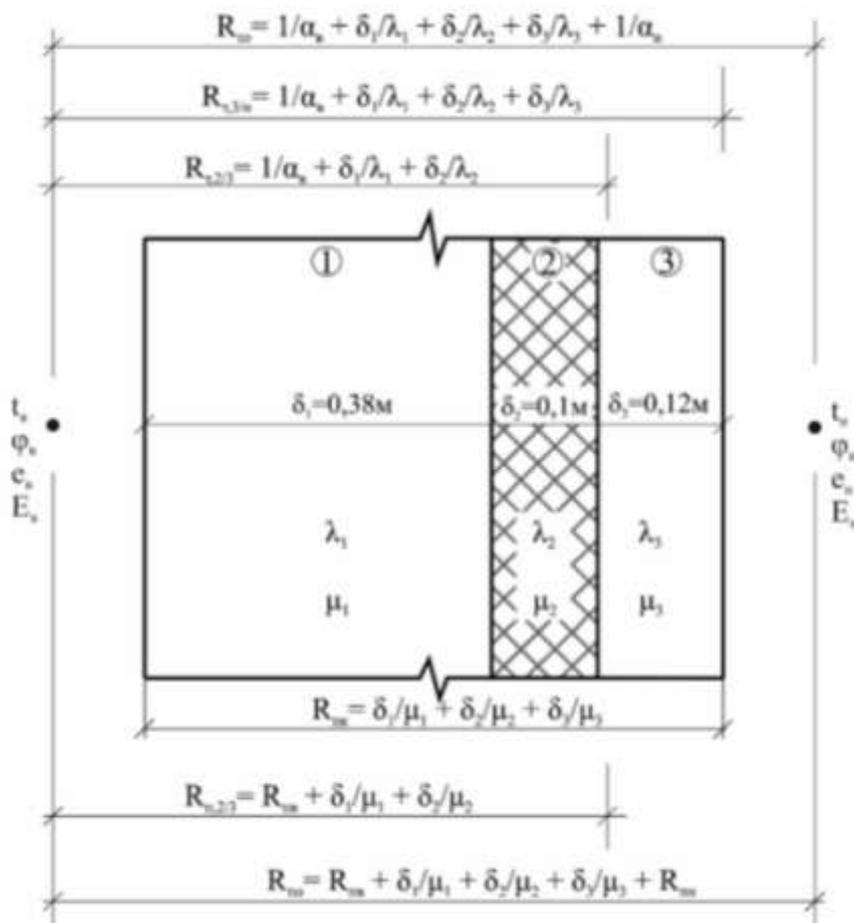


Рис. 3.4. Расчетная схема трехслойного ограждения

Определение сопротивлений влагообмену у внутренней $R_{\text{ПВ}}$ и наружной $R_{\text{ПН}}$ поверхностей ограждения. Расчет выполняется при среднегодовой температуре наружного воздуха ($t_{\text{н},1} = +4,2^\circ\text{C}$), то есть при отсутствии конденсации водяных паров.

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,24} \cdot 0,11 = 19,5^\circ\text{C}, \quad E_{\text{ВП}} = 2266 \text{ Па},$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2266 = 1133 \text{ Па},$$

$$\tau_{\text{Н}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/н}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,24} \cdot 3,2 = 4,4^\circ\text{C}, \quad E_{\text{НП}} = 836 \text{ Па},$$

$$e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па}.$$

Количество водяных паров, переносимых через слои ограждения $G_{\text{К}}$:

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1133 - 635}{4,85} = 103 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Сопротивления влагообмену у поверхностей ограждения:

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1133}{103} = 0,35 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{103} = 0,08 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}.$$

Общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции $R_{\text{ПО}}$:

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,35 + 4,85 + 0,08 = 5,28 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{П,2/3}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} = 0,38 + \frac{0,38}{0,11} + \frac{0,01}{0,32} = 4,11 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}.$$

Расчет температуры, давления насыщения и парциального давления водяного пара в расчетном сечении 2/3:

• При температуре $t_{\text{н},1} = +4,2^\circ\text{C}$:

$$\tau_{2/3} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,2/3}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,24} \cdot 3,03 = 5,2^\circ\text{C}, \quad E_{2/3} = 885 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,2/3}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{5,28} \cdot 4,11 = 747 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{2/3} - e_{2/3}) = 885 - 747 = 138 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{н},2} = -11,6^\circ\text{C}$:

$$\tau_{2/3} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,2/3}} = 20 - \frac{20 - (-11,6)}{3,24} \cdot 3,03 = -9,5^\circ\text{C}, \quad E_{2/3} = 268 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,2/3}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{5,28} \cdot 4,11 = 399 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{2/3} - e_{2/3}) = 268 - 399 = -131 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{н,3} = -21,8^\circ\text{C}$:

$$\tau_{2/3} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T},2/3} = 20 - \frac{20 - (-21,8)}{3,24} \cdot 3,03 = -19,1^\circ\text{C}, \quad E_{2/3} = 112 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},2/3} = 1169 - \frac{1169 - 73}{5,28} \cdot 4,11 = 316 \text{ Па}.$$

$$\text{Разность давлений } (E_{2/3} - e_{2/3}) = 112 - 316 = -204 \text{ Па}.$$

Результаты расчетов в координатах $(E - e)$ от t_H представлены на рисунке 3.5.



Рис. 3.5. Определение температуры начала конденсации $t_{нк}$ в расчетном сечении трехслойного ограждения

По рисунку 3.5 можно видеть, что зависимость $(E - e)$ от t_H в расчетном сечении пересекает горизонталь $(E - e) = 0$ при температуре наружного воздуха $t_H = -3^\circ\text{C}$, следовательно, эта температура и принимается за температуру начала конденсации $t_{нк}$ в трехслойной ограждающей конструкции.

Пример 3.4. *Определить температуру начала конденсации в однослойной ограждающей конструкции из кирпича, рассмотренной в примерах 2.3 и 2.4.*

Исходные данные для расчета:

$$\delta_1 = 0,77 \text{ м}, \quad R_{\text{ТО}} = 1,25 \left(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \right) / \text{Вт}, \quad R_{\text{ПК}} = 7,0 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг},$$

$$t_B = 20^\circ\text{C}, \quad \varphi_B = 55\%, \quad E_B = 2338 \text{ Па}, \quad e_B = 0,55 \cdot 2338 = 1286 \text{ Па},$$

$$t_H = 4,2^\circ\text{C}, \quad \varphi_H = 76\%, \quad E_H = 825 \text{ Па}, \quad e_H = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па}.$$

Расчет сопротивлений влагообмену $R_{\text{ВП}}$ и R_{HP} :

$$\tau_B = 20 - \frac{20 - 4,2}{1,25} \cdot 0,11 = 18,6^\circ\text{C}, \quad E_{\text{ВП}} = 2142 \text{ Па}, \quad e_{\text{ВП}} = 0,55 \cdot 2142 = 1178 \text{ Па},$$

$$\tau_H = 20 - \frac{20 - 4,2}{1,25} \cdot 1,21 = 4,7^\circ\text{C}, \quad E_{\text{HP}} = 854 \text{ Па}, \quad e_{\text{HP}} = 0,76 \cdot 854 = 649 \text{ Па},$$

$$G_k = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{HP}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1178 - 649}{7} = 75,6 \text{ мг} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right),$$

$$R_{\text{пв}} = \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{вп}}}{G_{\text{к}}} = \frac{1286 - 1178}{75,6} = 1,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} ,$$

$$R_{\text{пн}} = \frac{e_{\text{нп}} - e_{\text{н}}}{G_{\text{к}}} = \frac{649 - 627}{75,6} = 0,29 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} .$$

Общее сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции $R_{\text{по}}$:

$$R_{\text{по}} = R_{\text{пв}} + R_{\text{пк}} + R_{\text{пн}} = 1,4 + 7 + 0,29 = 8,69 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} .$$

Расчетное сечение в однослойной ограждающей конструкции располагается на расстоянии $2/3$ толщины от внутренней поверхности ограждения:

$$\delta_{\text{р.с.}} = \frac{2}{3} \cdot \delta = \frac{2}{3} \cdot 0,77 = 0,513 \text{ м} ,$$

$$R_{\text{т,р.с.}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{р.с.}}}{\lambda} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,513}{0,7} = 0,842 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{п,р.с.}} = R_{\text{пв}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} = 1,4 + \frac{0,513}{0,11} = 6,07 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} .$$

Расчет температуры, давления насыщения и парциального давления водяного пара в расчетном сечении $2/3$:

1) Среднегодовая температура наружного воздуха: $t_{\text{н},1} = +4,2 \text{ °C}$,
 $\varphi_{\text{н},1} = 76 \%$, $E_{\text{в}} = 825 \text{ Па}$, $e_{\text{в}} = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па}$

2) Средняя температура наиболее холодного месяца: $t_{\text{н},2} = -11,6 \text{ °C}$,
 $\varphi_{\text{н},2} = 80 \%$, $E_{\text{в}} = 225 \text{ Па}$, $e_{\text{в}} = 0,8 \cdot 225 = 180 \text{ Па}$

3) Средняя температура наиболее холодного месяца, уменьшенная на максимальную суточную амплитуду $t_{\text{н},3} = -11,6 + (-10,2) = -21,8 \text{ °C}$,
 $\varphi_{\text{н},3} = 84 \%$, $E_{\text{в}} = 87 \text{ Па}$, $e_{\text{в}} = 0,84 \cdot 87 = 73 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{н},1} = +4,2 \text{ °C}$:

$$\tau_{\text{р.с.}} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{то}}} \cdot R_{\text{т,р.с.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{1,25} \cdot 0,842 = 9,4 \text{ °C} , \quad E_{\text{р.с.}} = 1180 \text{ Па} ,$$

$$e_{\text{р.с.}} = e_{\text{в}} - \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{н}}}{R_{\text{по}}} \cdot R_{\text{п,р.с.}} = 1286 - \frac{1286 - 627}{8,69} \cdot 6,07 = 826 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e_{\text{р.с.}}) = 1180 - 826 = 354 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{н},2} = -11,6 \text{ °C}$:

$$\tau_{\text{р.с.}} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{то}}} \cdot R_{\text{т,р.с.}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{1,25} \cdot 0,842 = -1,3 \text{ °C} , \quad E_{\text{р.с.}} = 548 \text{ Па} ,$$

$$e_{\text{р.с.}} = e_{\text{в}} - \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{н}}}{R_{\text{по}}} \cdot R_{\text{п,р.с.}} = 1286 - \frac{1286 - 180}{8,69} \cdot 6,07 = 513 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{\text{р.с.}} - e_{\text{р.с.}}) = 548 - 513 = 35 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{н,3} = -21,8^\circ\text{C}$:

$$\tau_{p.c.} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{Т, p.c.}} \cdot R_{Т, p.c.} = 20 - \frac{20 + 21,8}{1,25} \cdot 0,842 = -8,2^\circ\text{C}, \quad E_{p.c.} = 304 \text{ Па},$$

$$e_{p.c.} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{П, p.c.}} \cdot R_{П, p.c.} = 1286 - \frac{1286 - 73}{8,69} \cdot 6,07 = 439 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{p.c.} - e_{p.c.}) = 304 - 439 = -135 \text{ Па}$.

Результаты расчетов в координатах $(E-e)$ от t_H представлены на рисунке 3.6.

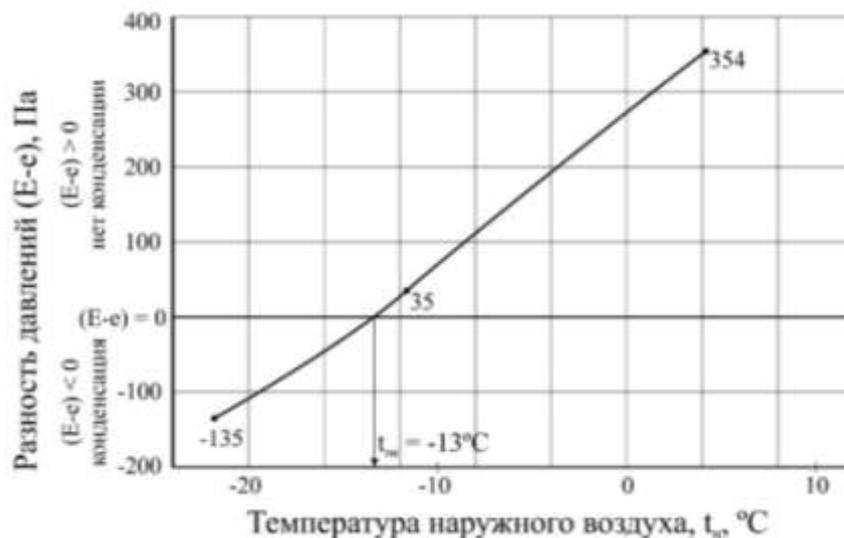


Рис. 3.6. Определение температуры начала конденсации $t_{нк}$ в расчетном сечении однослойного ограждения

По рисунку 3.6 можно видеть, что зависимость $(E - e)$ от t_H в расчетном сечении пересекает горизонталь $(E - e) = 0$ при температуре наружного воздуха $t_H = -13^\circ\text{C}$, следовательно, эта температура и принимается за температуру начала конденсации $t_{нк}$ в данной ограждающей конструкции.

Результаты определения температуры начала конденсации, приведенные в примерах 3.3 и 3.4, показали, что в однослойной ограждающей конструкции из кирпича $t_{нк} = -13^\circ\text{C}$, а в трехслойном ограждении с утеплителем из минеральной ваты и наружным слоем из кирпича $t_{нк} = -3^\circ\text{C}$. На основании этих результатов можно предположить, что каждое конструктивное решение ограждения будет иметь свою собственную температуру начала конденсации. При изменении конструкции ограждения или использовании материалов с другими свойствами должна изменяться и температура начала конденсации водяного пара. Для подтверждения высказанного предположения исследованы ограждающие конструкции других типов, в которых использованы различные материалы:

1. Ограждающая конструкция с тонким слоем наружной штукатурки (1 – внутренняя цементно-известковая штукатурка, 2 – силикатный кирпич, 3 – минераловатные плиты, 4 – штукатурка из сухих смесей)

2. Ограждающая конструкция с утеплителем из монолитного пенобетона (приведена в стандарте организации РОИС СТО 000-44807-001-2006 [23], 1 – внутренняя штукатурка из известково-песчаного раствора, 2 – керамический эффективный кирпич, 3 – монолитный пенобетон, 4 – керамический эффективный кирпич)

3. Ограждающая конструкция с утеплителем из экструдированного пенополистирола (приведена в СП 23-101-2004 [7], 1 – гипсовая штукатурка, 2 – железобетон, 3 – экструдированный пенополистирол, 4 – керамический кирпич, 5 – штукатурка из поризованного гипсоперлитового раствора).

На рисунке 3.7 представлены расчетные схемы перечисленных ограждающих конструкций.

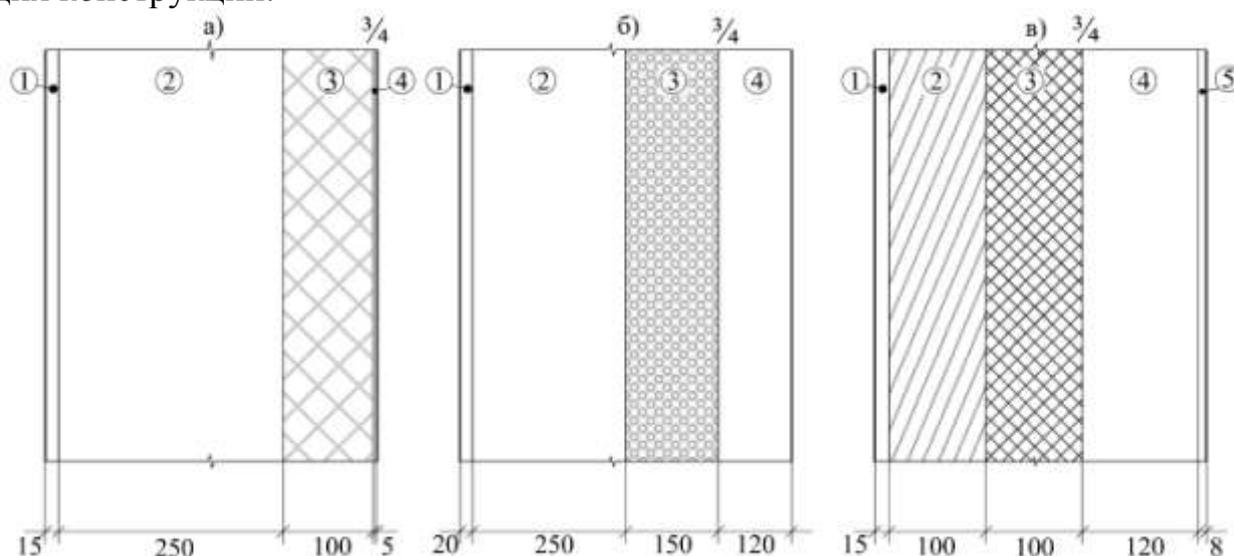


Рис. 3.7. Расчетные схемы ограждающих конструкций: а) с тонким слоем наружной штукатурки; б) с утеплителем из монолитного пенобетона; в) с утеплителем из экструдированного пенополистирола, 3/4 – расчетные сечения

Детальный расчет температур начала конденсации этих ограждающих конструкций приведен в Приложении 1, а результаты – в таблице 3.2. В этой же таблице приведены результаты расчетов из примеров 3.3 и 3.4.

Таблица 3.2

Характеристика некоторых типов ограждающих конструкций и их температура начала конденсации

№	Ограждающая конструкция	$R_{то}, (м^2 \cdot °C) / Вт$	$R_{по}, (м^2 \cdot ч \cdot Па) / мг$	$t_{нк}, °C$
	Однослойная из кирпича	1,25	8,69	-13
	С тонким слоем наружной штукатурки	2,94	3,26	-10
	С утеплителем из минваты и наружным слоем из кирпича	3,24	5,28	-3
	С утеплителем из монолитного пенобетона	2,40	3,86	-4
	С утеплителем из экструдированного пенополистирола	3,62	23,02	-15

Из таблицы 3.2 видно, что теплозащита ограждающих конструкций обеспечена в соответствии с требованиями СП 50 ($R_{To} = 2,4 - 3,62 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$), а конденсация водяного пара в каждом ограждении начнется при различных значениях температуры наружного воздуха в соответствии с величиной t_{HK} от -3 до -15°C .

Расчет t_{HK} ограждающих конструкций, представленный в таблице 3.2, выполнен при одних и тех же параметрах микроклимата помещений и климата места строительства, следовательно, формирование t_{HK} зависело только от конструкции ограждения и использованных материалов. Таким образом, предположение о том, что каждое конструктивное решение ограждений имеет собственную температуру начала конденсации t_{HK} , полностью подтвердилось.

3.3. Определение количества конденсата в ограждающих конструкциях

Конденсация водяных паров в ограждающих конструкциях является нежелательным фактором их эксплуатации, поскольку при увлажнении стеновых материалов снижаются их теплозащитные качества, возникают коррозионные процессы, образуется плесень, ускоряется разрушение облицовочных слоев за счет попеременного замораживания и оттаивания и, в конечном счете, снижается срок службы ограждающих конструкций.

При отсутствии конденсации через все слои ограждения проходит одинаковый диффузионный поток водяного пара G (3.8):

$$G = \frac{e_b - e_n}{R_{по}} = \frac{e_b - e_{вп}}{R_{пв}} = \frac{e_{вп} - e_{нп}}{R_{пк}} = \frac{e_{нп} - e_n}{R_{пн}}, \text{ мг / (м}^2 \cdot \text{ч)}.$$

При конденсации часть водяных паров переходит в жидкую фазу и нарушается равномерность диффузионных потоков. Плотность диффузионного потока, выходящего из ограждения, будет меньше плотности диффузионного потока, входящего в ограждение, на величину конденсата. На этом принципе построены расчетные схемы и расчетные формулы для определения количества конденсата в ограждающих конструкциях.

3.3.1. Выбор расчетной схемы

В классических трудах по строительной физике [11,17,18, 24, 25] приводятся две схемы по определению количества конденсата в ограждающих конструкциях в зависимости от формирования плоскости или зоны конденсации.

При наличии плоскости конденсации количество конденсата G_k определяется по формуле:

$$G_k = G' - G'' = \frac{e_b - E_k}{R'_{п1}} - \frac{E_k - e_n}{R''_{п2}}, \text{ мг / (м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (3.18)$$

Расчетная схема для этого случая приведена на рисунке 3.8 а.

При наличии зоны конденсации:

$$G_k = G_1 - G_2 = \frac{e_b - E_1}{R_{п1}} - \frac{E_2 - e_n}{R_{п2}}, \text{ мг / (м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (3.19)$$

Расчетная схема для этого случая приведена на рисунке 3.8 б.

В этих формулах и на расчетных схемах G_k – количество конденсата в мг, образующегося в 1 м^2 площади ограждающей конструкции в течение одного часа; G' и G_1 – плотность диффузионных потоков до конденсации, а G'' и G_2 – то же, после конденсации; $R_{п1}$ и $R_{п2}$ – сопротивление паропроницанию части ограждающей конструкции от внутреннего воздуха до плоскости или зоны конденсации, а $R_{п1}'$ и $R_{п2}'$ – то же, от плоскости или зоны конденсации до наружного воздуха; e_v , e_n – парциальные давления водяных паров во внутреннем и наружном воздухе; E_k , E_1 , E_2 – давление насыщения водяного пара в плоскости и в зоне конденсации.

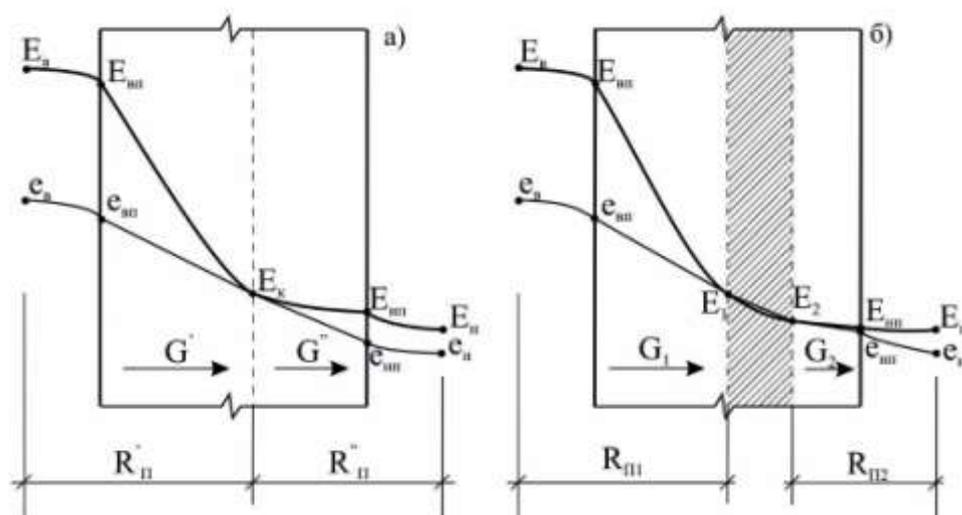


Рис. 3.8. Расчетные схемы при формировании плоскости конденсации (а) или зоны конденсации (б) в ограждающих конструкциях

Однако классические труды по строительной физике не дают рекомендаций о том, в каких случаях следует использовать схему расчета и формулу (3.18) для плоскости конденсации, а в каких – схему расчета и формулу (3.19) для зоны конденсации.

Исследование этих вопросов позволило установить, что плоскость конденсации возникает только при одной температуре наружного воздуха, которая получила наименование «температура начала конденсации», $t_{нк}$.

Эксплуатационные температуры наружного воздуха постоянно изменяются, поэтому формула (3.18) оказывается непригодной, она не моделирует реальный процесс конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях. Снижение температуры наружного воздуха t_n (ниже $t_{нк}$) приведет к образованию зоны конденсации, причем, чем ниже t_n (или чем больше разность $t_{нк} - t_n$), тем шире расходятся границы зоны конденсации в поперечном сечении ограждения.

Таким образом, формула (3.19) для зоны конденсации является универсальной, она позволяет учесть любые изменения температуры наружного воздуха в ее годовом ходе. При этом формула (3.18) является частным случаем

формулы (3.19) только для одного значения температуры наружного воздуха – температуры начала конденсации в данной ограждающей конструкции.

3.3.2. Расчет количества конденсата

Формула (3.19) позволяет определить количество конденсата G_k в мг, который образуется в 1 м^2 площади ограждения за 1 час при данной температуре наружного воздуха t_H ($\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$). Если эта температура остается постоянной в течение времени T , час., то количество конденсата в ограждении за это время определится по формуле:

$$Q_k = G_k \cdot T, \text{ мг}/\text{м}^2. \quad (3.20)$$

При другой температуре наружного воздуха или другой продолжительности ее действия T в ограждении образуется другое количество конденсата и за 1 час, и за время T [26–31].

В реальных условиях температура наружного воздуха непостоянная, что требует особых правил учета эксплуатационных температур и продолжительности их действия. Правила предусматривают деление годового хода температур наружного воздуха на небольшие интервалы, внутри которых температуру можно считать постоянной, и установление продолжительности действия этих температурных интервалов. При таких условиях задача сводится к оценке количества конденсата G_k и Q_k в каждом температурном интервале и последующего суммирования Q_k по всем температурным интервалам.

Необходимая для таких расчетов информация приведена в справочной литературе по строительной климатологии для интервалов температур в 1°C [4] и в 2°C [32]. В качестве примера в таблице 1 приведены данные по средней продолжительности двухградусных интервалов температуры наружного воздуха в Казани по [32].

Для оценки количества конденсата G_k по формуле (3.19) требуется прежде всего определить границы и расположение зоны конденсации на поперечном сечении ограждения для каждого температурного интервала, поскольку от величины и расположения зоны конденсации зависят параметры формулы (3.19): R_{T1} , R_{T2} , E_1 , E_2 , $R_{П1}$ и $R_{П2}$.

Зона конденсации определяется путем построения распределения разности давлений $(E - e)$ по основным и дополнительным сечениям ограждающей конструкции. Пересечения распределения разности $(E - e)$ с горизонталью $(E - e) = 0$ указывают на границы зоны конденсации, и если поперечное сечение ограждения выполнено в масштабе толщины материальных слоев, то данные для расчетных параметров R_{T1} , R_{T2} , $R_{П1}$, $R_{П2}$, а также E_1 и E_2 определяются простым измерением.

На рисунке 3.9 представлено распределение $(E - e)$ на поперечном сечении условного трехслойного ограждения при двух температурах наружного воздуха $t_{н1}$ и $t_{н2}$, причем $t_{н2}$ ниже $t_{н1}$.

Таблица 3.3

Средняя продолжительность двухградусных интервалов наружного воздуха в Казани

Интервал температур $t_n, ^\circ C$	Расчетная температура $t_p, ^\circ C$	Продолжительность действия T , часы	Интервал температур $t_n, ^\circ C$	Расчетная температура $t_p, ^\circ C$	Продолжительность действия T , часы
-34 ÷ -32,1	-33	18	-2 ÷ -0,1	-1	526
-32 ÷ -30,1	-31	26	0 ÷ 1,9	1	657
-30 ÷ -28,1	-29	35	2 ÷ 3,9	3	377
-28 ÷ -26,1	-27	44	4 ÷ 5,9	5	359
-26 ÷ -24,1	-25	70	6 ÷ 7,9	7	351
-24 ÷ -22,1	-23	79	8 ÷ 9,9	9	368
-22 ÷ -20,1	-21	114	10 ÷ 11,9	11	421
-20 ÷ -18,1	-19	140	12 ÷ 13,9	13	482
-18 ÷ -16,1	-17	158	14 ÷ 15,9	15	500
-16 ÷ -14,1	-15	201	16 ÷ 17,9	17	500
-14 ÷ -12,1	-13	245	18 ÷ 19,9	19	412
-12 ÷ -10,1	-11	280	20 ÷ 21,9	21	307
-10 ÷ -8,1	-9	324	22 ÷ 23,9	23	245
-8 ÷ -6,1	-7	342	24 ÷ 25,9	25	138
-6 ÷ -4,1	-5	394	>26	26	184
-4 ÷ -2,1	-3	448			

Из рисунка 3.9 следует, что пересечение распределения разности давлений $(E - e)$ с горизонталью $(E - e) = 0$ выделяет зону конденсации в той части поперечного сечения ограждения, в которой разность $(E - e) < 0$. Границы зоны конденсации являются основой для расчетов параметров формулы (3.19): $R_{п1}$ и $R_{п2}$ вместе с $R_{т1}$ и $R_{т2}$, на основании которых определяются E_1 и E_2 .

Из рисунка 3.9 видно также, что снижение температуры наружного воздуха от $t_{н1}$ до $t_{н2}$ расширяет зону конденсации, следовательно, изменяет условия конденсации и количество конденсата. Расчеты G_K и Q_K по формулам (3.19) выполняются по каждой расчетной температуре наружного воздуха.

Расчет начинается с самой низкой расчетной температуры для данной местности t_M и заканчивается температурой начала конденсации данного ограждения $t_{нк}$, потому что при t_n выше $t_{нк}$ конденсации водяных паров в данном ограждении не происходит. Можно предположить, что чем ниже $t_{нк}$, тем меньше расчетный диапазон $(t_M - t_{нк})$, и тем меньше конденсата накопится

в ограждении. Для проверки этого предположения рассмотрим накопление конденсата в двух ограждениях: с $t_{\text{НК}} = -13^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{НК}} = -3^{\circ}\text{C}$.

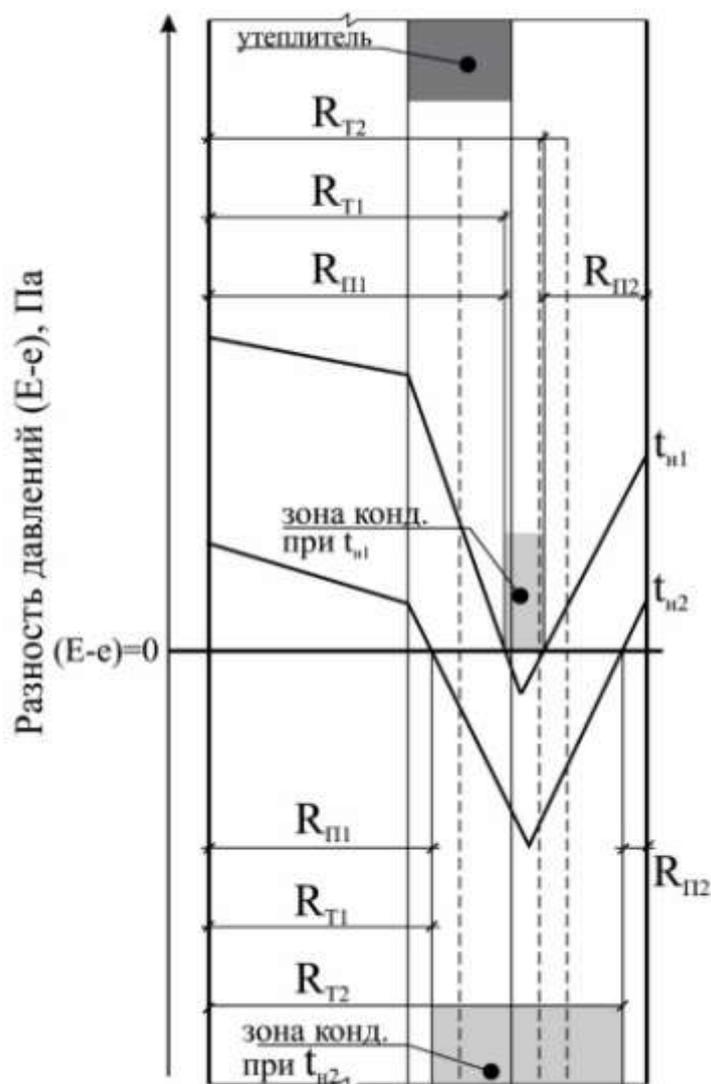


Рис. 3.9. Определение границ зон конденсации в условном ограждении при двух температурах наружного воздуха $t_{\text{н1}}$ и $t_{\text{н2}}$: сплошные линии – основные расчетные сечения, пунктир – дополнительные расчетные сечения

Пример 3.5. Определить количество конденсата в ограждающей конструкции, у которой $t_{\text{НК}} = -13^{\circ}\text{C}$.

Параметры ограждающей конструкции: однослойная кирпичная стена $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 770 \text{ мм}$, $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, $\mu = 0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

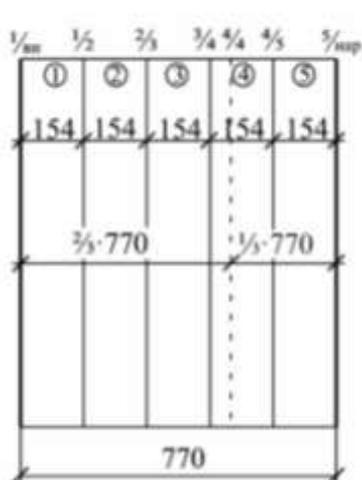
Теплотехнические параметры ограждения:

$$R_{\text{ТО}} = 1,25 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт}, R_{\text{ПК}} = 7,0 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг},$$

$$\text{для условного слоя: } R_{\text{Т1}} = 0,22 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт}, R_{\text{П1}} = 1,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}.$$

Сопrotивление теплопередаче и паропроницанию по расчетным сечениям:

Расчетные сечения



$$R_{T,1/B} = 0,11 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{T,1/2} = 0,33 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{T,2/3} = 0,55 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{T,3/4} = 0,77 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{T,4/4} = 0,84 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{T,4/5} = 0,99 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{T,5/H} = 1,21 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{\Pi,1/B} = 1,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг},$$

$$R_{\Pi,1/2} = 2,8 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг},$$

$$R_{\Pi,2/3} = 4,2 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг},$$

$$R_{\Pi,3/4} = 5,6 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг},$$

$$R_{\Pi,4/4} = 6,07 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг},$$

$$R_{\Pi,4/5} = 7,0 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг},$$

$$R_{\Pi,5/H} = 8,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}.$$

Рис. 3.10. Расчетная схема

Сопrotивления влагообмену у внутренней $R_{\Pi B}$ и наружной $R_{\Pi H}$ поверхности ограждения, общее сопротивление паропроницанию $R_{\Pi O}$ и температура начала конденсации t_{HK} :

$$R_{\Pi B} = 1,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, R_{\Pi H} = 0,29 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, R_{\Pi O} = 8,69 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, t_{HK} = -13 \text{°C}.$$

Параметры микроклимата помещения:

$$t_B = 20 \text{°C}, \varphi_B = 55\%, E_B = 2338 \text{Па}, e_B = 0,5 \cdot 2338 = 1286 \text{Па}.$$

Параметры климата места строительства (г. Казань) представлены в таблице 3.3.

Решение:

Расчет количества конденсата выполняется в два основных этапа:

1. По каждой расчетной температуре наружного воздуха определяются границы зоны конденсации, расчетные параметры и количество конденсата G_K по формуле (3.19), а по формуле (3.20) – количество конденсата Q_K за период действия расчетной температуры (T , часы);
2. Заполняется сводная таблица количества конденсата G_K и Q_K по каждой расчетной температуре наружного воздуха и выполняется суммирование Q_K по всем расчетным температурам.

Границы зон конденсации при минимальной расчетной температуре наружного воздуха: $t_H = -33 \text{°C} (E_H = 27 \text{Па}, e_H = 0,827 = 22 \text{Па})$.

• Сечение 1/2

$$\tau_{1/2} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\Pi O}} \cdot R_{T,1/2} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 0,33 = 6,0 \text{°C}, E_{1/2} = 934 \text{Па},$$

$$e_{1/2} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},1/2} = 1286 - \frac{1286 - 22}{8,69} \cdot 2,8 = 879 \text{ Па.}$$

Разность давлений $(E - e) = 934 - 879 = 55 \text{ Па.}$

• Сечение 2/3

$$\tau_{2/3} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т},2/3} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 0,55 = -3,3^\circ \text{C}, E_{2/3} = 464 \text{ Па,}$$

$$e_{2/3} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},2/3} = 1286 - \frac{1286 - 22}{8,69} \cdot 4,2 = 675 \text{ Па.}$$

Разность давлений $(E - e) = 464 - 675 = -211 \text{ Па.}$

• Сечение 3/4

$$\tau_{3/4} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т},3/4} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 0,77 = -12,6^\circ \text{C}, E_{3/4} = 207 \text{ Па,}$$

$$e_{3/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},3/4} = 1286 - \frac{1286 - 22}{8,69} \cdot 5,6 = 471 \text{ Па.}$$

Разность давлений $(E - e) = 207 - 471 = -264 \text{ Па.}$

• Сечение 4/4

$$\tau_{4/4} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т},4/4} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 0,84 = -15,6^\circ \text{C}, E_{4/4} = 156 \text{ Па,}$$

$$e_{4/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},4/4} = 1286 - \frac{1286 - 22}{8,69} \cdot 6,07 = 403 \text{ Па.}$$

Разность давлений $(E - e) = 156 - 403 = -247 \text{ Па.}$

• Сечение 4/5

$$\tau_{4/5} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т},4/5} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 0,99 = -22^\circ \text{C}, E_{4/5} = 85 \text{ Па,}$$

$$e_{4/5} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},4/5} = 1286 - \frac{1286 - 22}{8,69} \cdot 7,0 = 268 \text{ Па.}$$

Разность давлений $(E - e) = 85 - 268 = -183 \text{ Па.}$

• Сечение 5/н

$$\tau_{5/н} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т},5/н} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 1,21 = -31,3^\circ \text{C}, E_{5/н} = 33 \text{ Па,}$$

$$e_{5/н} = \frac{\varphi \cdot E_{5/н}}{100} \cdot R_{\text{П},5/н} = \frac{80 \cdot 33}{100} = 26 \text{ Па.}$$

Разность давлений $(E - e) = 33 - 26 = 7 \text{ Па.}$

Результаты расчета разности давлений ($E-e$) переносятся на поперечное сечение ограждения, которое выполнено в масштабе толщины слоев (рис. 3.11).

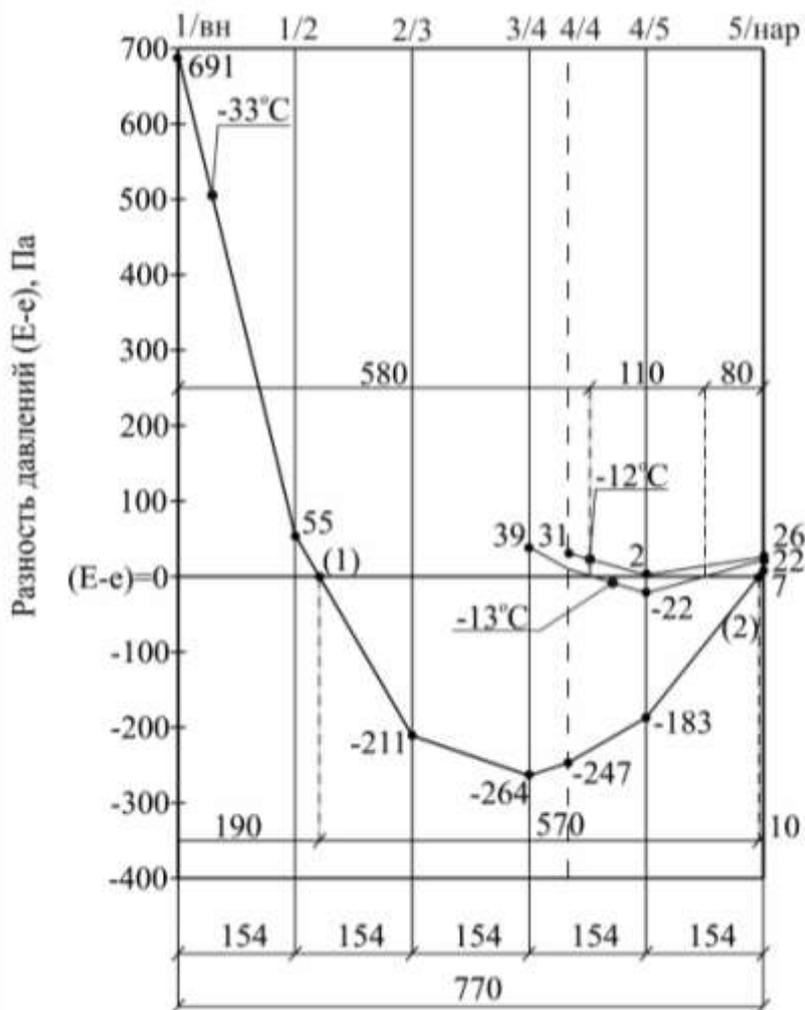


Рис. 3.11. Определение границ зоны конденсации при $t_H = -33^\circ\text{C}$ (точки 1 и 2) и при $t_H = -13^\circ\text{C}$

Из рисунка 3.11 видно, что распределение разности давлений при $t_H = -33^\circ\text{C}$ пересекает горизонталь $(E - e) = 0$ в точках 1 и 2. Расстояние между этими точками (570 мм) и является зоной конденсации, потому что распределение $(E - e)$ в этом интервале расположено ниже горизонтали $(E - e) = 0$. Расположение и размер зоны конденсации разделили поперечное сечение ограждения на отдельные участки: 190 мм (от внутренней поверхности до точки 1) и 10 мм (от точки 2 до наружной поверхности).

На том же рисунке 3.11 показано, что при $t_{\text{HK}} = -13^\circ\text{C}$ еще существует конденсация водяного пара на небольшом участке ограждения (110 мм), а при повышении температуры наружного воздуха на один градус (до $t_H = -12^\circ\text{C}$) конденсация прекращается, потому что распределение $(E - e)$ расположено выше горизонтали $(E - e) = 0$.

Алгоритм определения границ зоны конденсации при $t_H = -33^\circ\text{C}$ использован и для других расчетных температур. Результаты расчета приведены на рисунке 3.12. Из рисунка 3.12 видно, что расстояние от внутренней поверхности ограждения до точки 1 увеличивается с повышением температуры наружного воздуха от 190 мм при $t_H = -33^\circ\text{C}$ до 580 мм при $t_H = -13^\circ\text{C}$. Расстояние от точки 2 до наружной поверхности также увеличивается, но значительно медленнее: от 10 мм при $t_H = -33^\circ\text{C}$ до 80 мм при $t_H = -13^\circ\text{C}$.

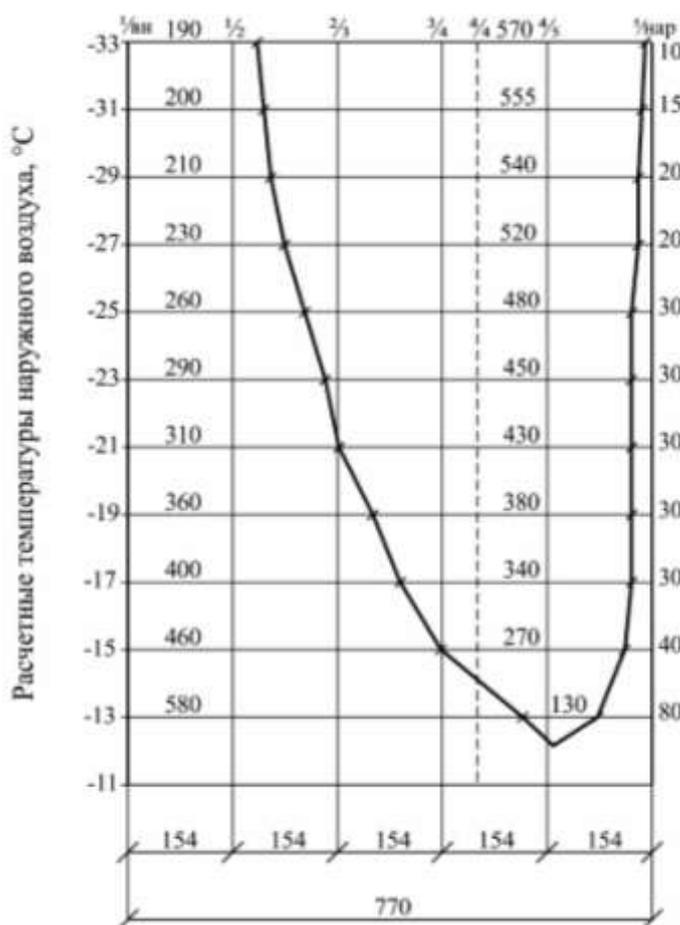


Рис. 3.12. Границы зон конденсации в однослойном ограждении в интервале температур наружного воздуха от -33°C до -13°C

Расположение границ зон конденсации по рисунку 3.12 выделяет те участки поперечного сечения ограждения, которые используются для определения параметров формулы (3.19). Так, расстояние от внутренней поверхности ограждения до точки 1 (190 мм) используется для определения $R_{П1}$ и $R_{Т1}$ (а, следовательно, и E_1), расстояние от внутренней поверхности до точки 2

(190+570 мм) – для определения $R_{Т2}$ (а, следовательно, и E_2), расстояние от точки 2 до наружной поверхности – для определения $R_{П2}$.

Расчет параметров формулы (3.19) и количество конденсата при расчетной температуре $t_H = -33^\circ\text{C}$:

$$R_{П1} = R_{ПВ} + \frac{0,19}{\mu} = 1,4 + \frac{0,19}{0,11} = 3,1 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг},$$

$$R_{П2} = \frac{0,01}{\mu} + R_{ПН} = \frac{0,01}{0,11} + 0,29 = 0,38 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг},$$

$$R_{Т1} = R_{ТВ} + \frac{0,19}{\lambda} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,19}{0,7} = 0,38 \left(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \right) / \text{Вт},$$

$$R_{Т2} = R_{ТВ} + \frac{0,19 + 0,57}{\lambda} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,19 + 0,57}{0,7} = 1,19 \left(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \right) / \text{Вт}.$$

Температура и предел упругости водяного пара в точке 1:

$$t_1 = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{ТО}} \cdot R_{Т1} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 0,38 = 3,9^\circ\text{C}, E_1 = 808 \text{ Па}.$$

Температура и предел упругости водяного пара в точке 2:

$$t_2 = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{ТО}} \cdot R_{Т2} = 20 - \frac{20 + 33}{1,25} \cdot 1,19 = -30,4^\circ\text{C}, E_2 = 36 \text{ Па}.$$

Количество конденсата в один час:

$$G_K = G_1 - G_2 = \frac{e_B - E_1}{R_{П1}} - \frac{E_2 - e_H}{R_{П2}} = \frac{1286 - 808}{3,1} - \frac{36 - 22}{0,38} = 154 - 37 = 117 \text{ мг} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right).$$

Количество конденсата за время действия температуры $t_H = -33^\circ\text{C}$ ($T=18$ часов, таблица 3.3):

$$Q_K = G_K \cdot T = 117 \cdot 18 = 2106 \text{ мг} / \text{м}^2.$$

По описанному алгоритму выполнены расчеты для других температур наружного воздуха. Результаты расчета представлены в таблице 3.4.

Из таблицы 3.4 видно, что с повышением температуры наружного воздуха снижается поток водяного пара к зоне конденсации G_1 (столбец 4), а поток водяного пара от зоны конденсации в наружный воздух G_2 (столбец 5) растет. К температуре $t_H = -13^\circ\text{C}$ эти потоки выравниваются, а при $t_H = -12^\circ\text{C}$ разность потоков становится отрицательной ($G_1 - G_2 = -4$), следовательно, начинает преобладать «высушивание» ограждения.

Таблица 3.4

**Расчет количества конденсата в однослойной ограждающей конструкции,
у которой $t_{нк} = -13^{\circ}\text{C}$ в климате Казани**

Температура наружного воздуха			Поток водяного пара		Количество конденсата	
Интервал, $^{\circ}\text{C}$	Расчетная, $^{\circ}\text{C}$	Время действия T , часы	к зоне кон- денсации G_1	от зоны кон- денсации G_2	В 1 час $G_k = G_1 - G_2$	За время T $Q_k = G_k \cdot T$
1	2	3	4	5	6	7
-34 ÷ -32,1	-33	18	154	37	117	2106
-32 ÷ -30,1	-31	26	156	23	133	3458
-30 ÷ -28,1	-29	35	145	27	118	4130
-28 ÷ -26,1	-27	44	144	59	85	3740
-26 ÷ -24,1	-25	70	145	67	78	5460
-24 ÷ -22,1	-23	79	143	70	73	5767
-22 ÷ -20,1	-21	114	138	89	49	5586
-20 ÷ -18,1	-19	140	135	96	39	5460
-18 ÷ -16,1	-17	158	135	111	24	3792
-16 ÷ -14,1	-15	201	134	125	9	1809
-14 ÷ -12,1	-13	245	132	127	5	1225
-	-12	-	124	128	-4	
Всего за период увлажнения: $\sum Q_k = 42543 \text{ мг} / \text{м}^2$						

Общее количество конденсата за период увлажнения составляет $42,5 \text{ г} / \text{м}^2$. Анализ последствий такого увлажнения для снижения теплозащиты ограждающих конструкций, процессов замораживания–размораживания или других негативных последствий являются задачей, требующей самостоятельного изучения.

Пример 3.6. Определить количество конденсата в ограждающей конструкции, у которой $t_{нк} = -3^{\circ}\text{C}$.

Параметры ограждающей конструкции: трехслойная ограждающая конструкция с внутренним и наружным слоем из керамического кирпича:

$$\rho_0 = 1800 \text{ кг} / \text{м}^3, \delta_1 = 38 \text{ см}, \delta_3 = 12 \text{ см}, \lambda = 0,7 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}), \mu = 0,11 \text{ мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$$

и средним слоем из минераловатных плит:

$$\rho_0 = 100 \text{ кг} / \text{м}^3, \delta_2 = 10 \text{ см}, \lambda = 0,042 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}), \mu = 0,32 \text{ мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}).$$

Основные теплотехнические параметры:

$$R_{то} = 3,24 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт}, R_{пв} = 0,35 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}, R_{по} = 5,28 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг},$$

$$R_{пн} = 0,08 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}, R_{тн} = 0,22 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт}, R_{тп} = 1,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}.$$

Сопротивление теплопередаче и паропроницанию по расчетным сечениям:



Рис. 3.13. Расчетная схема

$$\begin{aligned}
 R_{T,1/2} &= 0,65 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, & R_{\Pi,1/В} &= 0,35 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, \\
 R_{T,2/2} &= 1,84 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, & R_{\Pi,1/2} &= 3,8 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, \\
 R_{T,2/3} &= 3,03 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, & R_{\Pi,2/2} &= 3,96 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, \\
 R_{T,3/1} &= 3,07 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, & R_{\Pi,2/3} &= 4,11 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, \\
 R_{T,3/2} &= 3,11 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, & R_{\Pi,3/1} &= 4,38 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, \\
 R_{T,3/Н} &= 3,2 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, & R_{\Pi,3/2} &= 4,65 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}, \\
 R_{T,1/В} &= 0,11 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт}, & R_{\Pi,3/Н} &= 5,2 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг}.
 \end{aligned}$$

Параметры микроклимата:

$$t_B = 20 \text{°C}, \varphi_B = 50 \%, E_B = 2338 \text{ Па}, e_B = 0,5 \cdot 2338 = 1169 \text{ Па}.$$

Параметры климата места строительства (Казань) представлены в таблице 3.3.

Решение:

Аналогично примеру 3.5 определены границы зон конденсации по каждой расчетной температуре наружного воздуха в интервале от $t_H = -33 \text{°C}$ до $t_H = -3 \text{°C}$, то есть от минимальной температуры наружного воздуха места строительства до температуры начала конденсации в данном трехслойном ограждении $t_{НК} = -3 \text{°C}$. Данные представлены на рисунке 3.14.

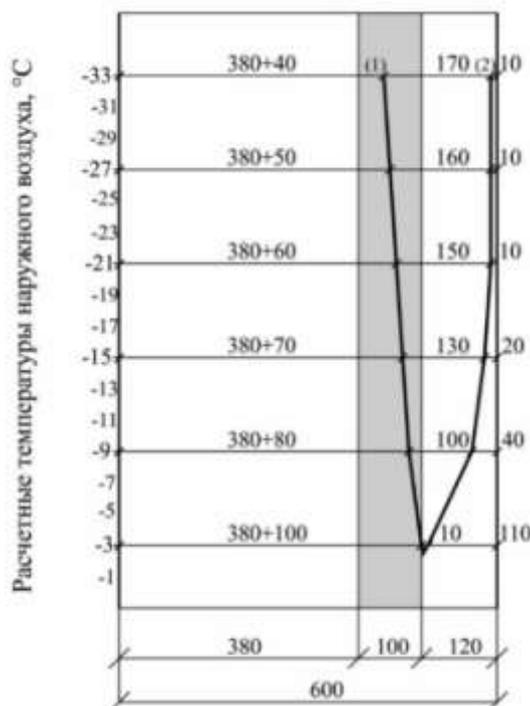


Рис. 3.14. Границы зон конденсации в трехслойном ограждении в интервале температур наружного воздуха от -33°C до -3°C

Границы зон конденсации с учетом нахождения в них различных материальных слоев положены в основу определения количества конденсата по формулам (3.19) и (3.20). Расчет количества конденсата приведен в таблице 3.5.

Общее количество конденсата в ограждающей конструкции с $t_{\text{НК}} = -3^{\circ}\text{C}$ составляет $144,42\text{ г/м}^2$, что более чем в три раза превышает количество конденсата, образующегося в ограждении с $t_{\text{НК}} = -13^{\circ}\text{C}$. Расчеты, выполненные в примерах 3.5 и 3.6, подтверждают ранее высказанные предположения о том, что температура начала конденсации ограждающей конструкции $t_{\text{НК}}$ является индикатором переувлажнения ограждающих конструкций в эксплуатации.

Таким образом, определяя $t_{\text{НК}}$ ограждающей конструкции на стадии ее проектирования и сопоставляя ее с годовым ходом температуры наружного воздуха (по примеру рис. 5.3), можно предсказать уровень переувлажнения ограждений в заданных условиях эксплуатации.

Таблица 3.5

Расчет количества конденсата в трехслойной ограждающей конструкции, у которой $t_{\text{НК}} = -3^{\circ}\text{C}$ в климате Казани

Температура наружного воздуха			Поток водяного пара		Количество конденсата	
Интервал, $^{\circ}\text{C}$	Расчетная, $^{\circ}\text{C}$	Время действия T , часы	к зоне конденсации G_1	к зоне конденсации G_2	В 1 час $G_{\text{к}} = G_1 - G_2$	За время T $Q_{\text{к}} = G_{\text{к}} \cdot T$
1	2	3	4	5	6	7
-34 ÷ -32,1	-33	18	210	53	157	2826
-32 ÷ -30,1	-31	26	207	60	147	3822
-30 ÷ -28,1	-29	35	204	68	136	4760
-28 ÷ -26,1	-27	44	200	73	127	5580
-26 ÷ -24,1	-25	70	173	79	118	8260
-24 ÷ -22,1	-23	79	192	86	106	8374
-22 ÷ -20,1	-21	114	189	82	107	12198
-20 ÷ -18,1	-19	140	184	98	86	12040
-18 ÷ -16,1	-17	158	180	103	77	12166
-16 ÷ -14,1	-15	201	176	110	66	13266
-14 ÷ -12,1	-13	245	182	116	56	13720
-12 ÷ -10,1	-11	280	169	121	48	134740
-10 ÷ -8,1	-9	324	166	128	38	12312
-8 ÷ -6,1	-7	342	160	133	27	9234
-6 ÷ -4,1	-5	394	158	139	19	7486
-4 ÷ -2,1	-3	448	153	142	11	4928
	-2		125	161	-36	
Всего за период увлажнения: $\sum Q_{\text{к}} = 144420\text{ мг/м}^2$						

4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА КОНДЕНСАЦИИ

В предыдущих разделах обосновано введение нового теплотехнического параметра – «Температура начала конденсации ограждений $t_{\text{НК}}$ ». Показано, что $t_{\text{НК}}$ численно равна температуре наружного воздуха $t_{\text{Н}}$, при которой в плоскости максимального увлажнения ограждающих конструкций начинается конденсация водяного пара. С этой точки зрения $t_{\text{НК}}$ является индикатором переувлажнения ограждающих конструкций.

Установлено также, что $t_{\text{НК}}$ зависит от конструктивного решения ограждений и использованных материалов, и показано, что каждая ограждающая конструкция имеет собственное значение $t_{\text{НК}}$. Из этого следует, что отдельные параметры ограждающих конструкций и свойства материальных слоев должны влиять на формирование величины $t_{\text{НК}}$.

4.1. Влияние сопротивления теплопередаче

После перехода строительной отрасли на повышенную теплозащиту зданий сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций возросло более чем в три раза: для средней полосы страны с $0,8 \div 1,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$ до $3 \div 4 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$. Появились многослойные ограждающие конструкции с эффективными утеплителями, а массовое распространение получили трехслойные конструкции с эффективным утеплителем и наружным слоем из облицовочного кирпича. После 7–10 лет эксплуатации зданий с такими ограждающими конструкциями в наружном кирпичном слое стали образовываться трещины, выкрашивания и разрушения (раздел 1.3, рис. 1.1).

Первая причина такого разрушения заключается в малой тепловой инерции наружного слоя, который имеет толщину 120 мм. В связи с этим наружный слой быстрее нагревается и быстрее остывает, следовательно, чаще замораживается и оттаивает. В работе [33] отмечается, что только за март месяц в условиях Москвы наружный кирпичный слой шесть раз замораживается и оттаивает.

Вторая причина связана с высоким сопротивлением теплопередаче ограждающих конструкций, при котором тормозится тепловой поток из помещения, и его влияние на наружный слой оказывается незначительным. В результате температура в наружном слое лишь немного превышает температуру наружного воздуха. Так, при $R_{\text{T}} = 3,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$ и температуре наружного воздуха $t_{\text{Н}} = -25 \text{ °C}$ температура на наружной поверхности кирпичного слоя

равна $-24,4^{\circ}\text{C}$, а на его внутренней поверхности равна $-21,5^{\circ}\text{C}$. При таких температурах происходит глубокое промерзание наружного слоя. В ограждающей конструкции с $R_T = 1,2 \left(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \right) / \text{Вт}$ теплотери будут выше, но тепловой поток из помещения будет «прогревать» наружный слой, в котором сформируется более высокий температурный режим. В этом ограждении при той же температуре наружного воздуха (-25°C) температура на наружной поверхности будет $-23,4^{\circ}\text{C}$, а на внутренней будет $-15,6^{\circ}\text{C}$, следовательно, снизится вероятность разрушения наружного слоя при замораживании и оттаивании.

Анализ причин разрушения трехслойных конструкций с наружным слоем из кирпича позволил авторам работы [33] сделать непопулярное заключение: **с ростом сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций быстрее разрушается их наружный слой.**

С учетом вышеизложенного можно предположить, что сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций будет влиять на температуру начала конденсации $t_{\text{НК}}$ [38]. Для проверки этого предположения определим $t_{\text{НК}}$ в двух ограждающих конструкциях, которые имеют одинаковые размеры поперечного сечения, но за счет различия свойств теплоизоляционных слоев имеют значения сопротивлений теплопередаче, различающиеся почти в три раза.

Параметры материальных слоев ограждающих конструкций представлены в таблице 4.1. Расчетные теплотехнические показатели ограждающих конструкций представлены в таблице 4.2. В этой таблице $R_{\text{ТО}}$ и $R_{\text{ПО}}$ – общие сопротивления теплопередаче и паропроницанию ограждающих конструкций, $R_{\text{T},2/3}$ и $R_{\text{П},2/3}$ – сопротивления теплопередаче и паропроницанию части ограждающей конструкции от внутреннего воздуха до сечения 2/3, то есть плоскости конденсации.

Таблица 4.1

**Характеристика материальных слоев
ограждающих конструкций**

№ слоя	Назначение слоя	Материал слоя и его свойства	
		Вариант 1	Вариант 2
1	Конструкционный слой	Керамический кирпич $\delta_1 = 0,38, \lambda_1 = 0,7, \mu_1 = 0,11$	Керамический кирпич $\delta_1 = 0,38, \lambda_1 = 0,7, \mu_1 = 0,11$
2	Теплоизоляционный слой	Минеральная вата $\delta_2 = 0,1, \lambda_2 = 0,042, \mu_2 = 0,32$	Керамзитобетон $\delta_2 = 0,1, \lambda_2 = 0,24, \mu_2 = 0,19$
3	Наружный облицовочный слой	Керамический кирпич $\delta_3 = 0,12, \lambda_3 = 0,7, \mu_3 = 0,11$	Керамический кирпич $\delta_3 = 0,12, \lambda_3 = 0,7, \mu_3 = 0,11$

**Теплотехнические показатели
ограждающих конструкций**

Расчетные формулы теплотехнических показателей	Значения показателей	
	Вариант 1	Вариант 2
$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{Н}}}$	3,24	1,27
$R_{\text{Т,2/3}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}$	3,03	1,07
$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + R_{\text{ПН}}$	5,28	5,5
$R_{\text{П,2/3}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2}$	4,11	4,33

Для определения температур начала конденсации ограждающих конструкций определяется разность давлений ($E - e$) в плоскости конденсации (сечение 2/3) при нескольких температурах наружного воздуха.

Расчет выполнен при пяти температурах наружного воздуха: 0, -5, -7, -10 и -25°C. Относительная влажность наружного воздуха для всех температур принята: $\varphi_{\text{Н}} = 84\%$. Параметры микроклимата помещения:

$$t_{\text{В}} = 20^{\circ}\text{C}, \varphi_{\text{В}} = 50\%, E_{\text{В}} = 2338 \text{ Па}, e_{\text{В}} = 0,5 \cdot 2338 = 1169 \text{ Па}.$$

Температура $t_{\text{Н}} = 0^{\circ}\text{C}$, $E_{\text{Н}} = 610 \text{ Па}$, $e_{\text{Н}} = 0,84 \cdot 610 = 513 \text{ Па}$.

В ограждающей конструкции по варианту 1 ($R_{\text{ТО}} = 3,24 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$):

$$\tau_{2/3} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,2/3}} = 20 - \frac{20 - 0}{3,24} \cdot 3,03 = 1,3^{\circ}\text{C}, E_{2/3} = 670 \text{ Па} ,$$

$$e_{2/3} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{Т,2/3}} = 1169 - \frac{1169 - 513}{5,28} \cdot 4,11 = 658 \text{ Па} .$$

Разность давлений ($E - e$) = 670 - 658 = 12 Па.

В ограждающей конструкции по варианту 2 ($R_{\text{ТО}} = 1,27 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$):

$$\tau_{2/3} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,2/3}} = 20 - \frac{20 - 0}{1,27} \cdot 1,07 = 3,1^{\circ}\text{C}, E_{2/3} = 764 \text{ Па} ,$$

$$e_{2/3} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{Т,2/3}} = 1169 - \frac{1169 - 513}{5,5} \cdot 4,33 = 652 \text{ Па} .$$

Разность давлений ($E - e$) = 764 - 652 = 112 Па.

Аналогично рассчитана разность давлений ($E - e$) при остальных температурах наружного воздуха (табл. 4.3).

**Разность давлений ($E-e$) в сечении 2/3
при разных температурах наружного воздуха**

Температура наружного воздуха $t_n, ^\circ\text{C}$	Разность ($E - e$), Па	
	Вариант 1 $R_{\text{то}} = 3,24 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Вариант 2 $R_{\text{то}} = 1,27 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
0	12	112
-5	-61	45
-7	-85	17
-10	-120	-27
-25	-215	-163

По данным таблицы 4.3 построена графическая зависимость, на основании которой определена температура начала конденсации в каждом варианте ограждающих конструкций (рис. 4.1).

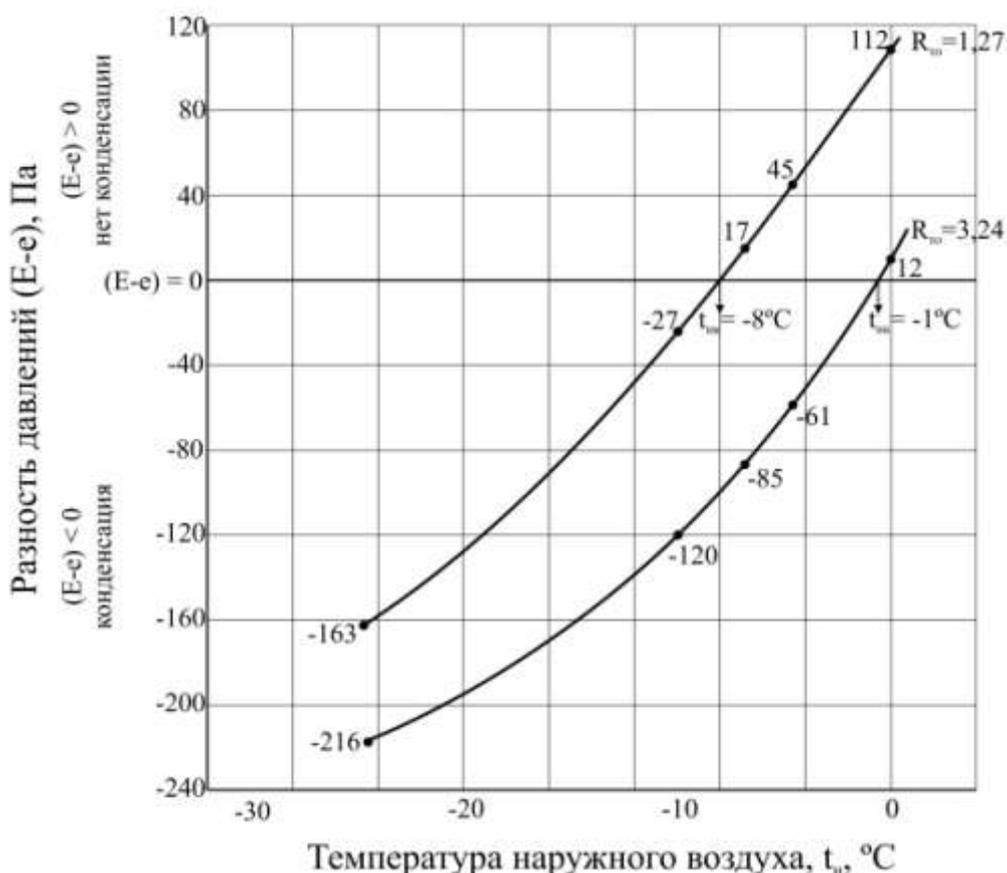


Рис. 4.1. Определение температуры начала конденсации в ограждающих конструкциях с $R_{\text{то}} = 1,27 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ и $R_{\text{то}} = 3,24 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

Из рисунка 4.1 следует, что при увеличении сопротивления теплопередаче с $1,27$ до $3,24 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$ температура начала конденсации увеличилась с -8 до -1°C , что, несомненно, увеличивает продолжительность конденсации и коли-

чество конденсата. Очевидно, что этот факт, описанный в работе [33], также явился одной из причин более интенсивного разрушения наружного слоя из кирпича в ограждающей конструкции с $R_{\text{ТО}} = 3,2 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}$.

4.2. Влияние последовательности расположения материальных слоев

Многие исследователи предлагали располагать слои с высоким сопротивлением паропрооницанию у внутренней поверхности, а с низким – у наружной поверхности. Роджерс [24] при анализе взаимного расположения материальных слоев вводит понятие «Паропрооницаемость слоя», которая является величиной, обратной сопротивлению паропрооницанию слоя, то есть

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\mu}{\delta}, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}). \quad (4.1)$$

Паропрооницаемость слоя является характеристикой «пропускной способности слоя» и показывает количество водяных паров в мг, которые могут проходить через 1 м^2 площади поверхности слоя в течение 1 часа, при разности парциальных давлений водяного пара на разных сторонах слоя в 1 Па.

Если материальные слои в ограждающей конструкции расположить в порядке возрастания их паропрооницаемости от внутренней до наружной поверхности, то, пройдя через внутренний слой, водяные пары с легкостью преодолеют следующий слой, и так далее до наружного облицовочного слоя.

$$G_{\text{В}} < G_1 < G_2 < \dots < G_{\text{Н}}. \quad (4.2)$$

При выполнении этого неравенства можно свести к минимуму или исключить конденсацию водяных паров, если паропрооницаемость наружного слоя $G_{\text{Н}}$ будет в пять раз больше паропрооницаемости внутреннего слоя $G_{\text{В}}$ [24].

$$G_{\text{Н}} = 5 \cdot G_{\text{В}}. \quad (4.3)$$

Влияние взаимного расположения слоев на конденсацию водяного пара весьма наглядно можно проследить на анализе двухслойной ограждающей конструкции, состоящей только из конструкционного и теплоизоляционного слоев.

Пример 4.1. *Определить влияние взаимного расположения слоев в двухслойном ограждении на конденсацию в нем водяного пара. Вариант а – утеплитель расположен со стороны наружной поверхности, вариант б – со стороны внутренней поверхности.*

1) Конструкционный слой – монолитный железобетон:

$$\rho_0 = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3, \delta_1 = 0,1 \text{ м}, \lambda_1 = 2,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}), \mu_1 = 0,03 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$$

2) Теплоизоляционный слой – минераловатные плиты $\rho_0 = 45 \text{ кг}/\text{м}^3$,

$$\delta_2 = 0,2 \text{ м}, \lambda_2 = 0,047 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}), \mu_2 = 0,5 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$$

3) Параметры климата и микроклимата: $t_{\text{В}} = 20 \text{ °C}$, $\varphi_{\text{В}} = 50 \%$, $E_{\text{В}} = 2338 \text{ Па}$, $e_{\text{В}} = 1169 \text{ Па}$, $t_{\text{Н}} = -25 \text{ °C}$, $\varphi_{\text{Н}} = 84 \%$, $E_{\text{Н}} = 63 \text{ Па}$, $e_{\text{Н}} = 53 \text{ Па}$.

Для упрощения расчетов и наглядности в ограждающей конструкции отсутствует штукатурка. С этой же целью не приводим расчеты традиционных параметров, а сразу представляем на рисунке 4.2 результаты этих расчетов.

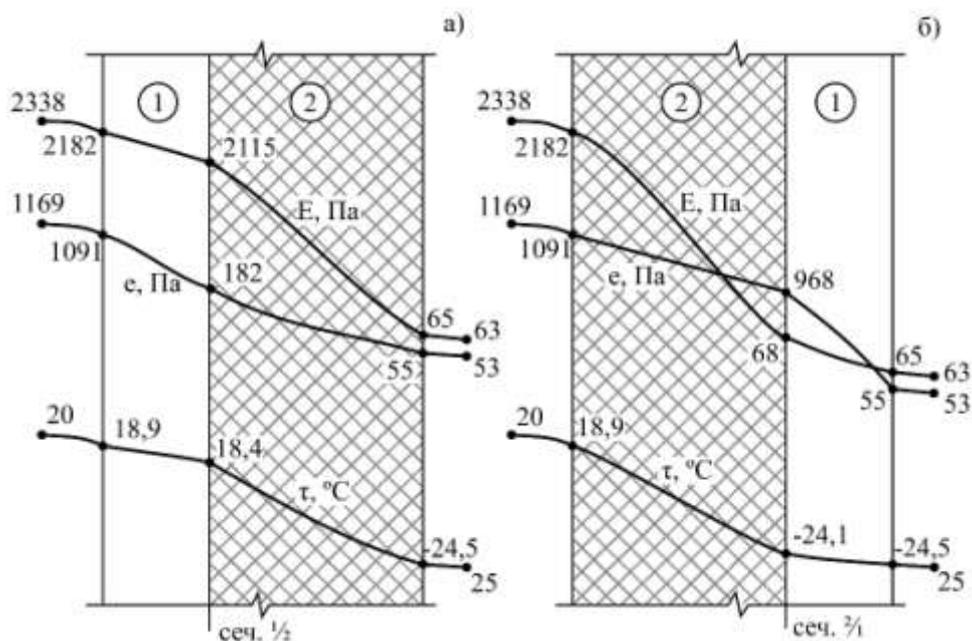


Рис. 4.2. Влияние взаимного расположения слоев на конденсацию водяного пара
E – давление насыщения водяного пара, *e* – парциальное давление водяного пара,
τ – распределение температур по сечению ограждения

Из рисунка 4.2 видно, что при расположении слоев по варианту *a* конденсат в ограждении отсутствует, а по варианту *б* – выпадает конденсат в сечении 2/1. То есть вариант *б* является проблемным.

Аналогичный результат можно было получить путем сопоставления паропроницаемости слоев *G*:

$$G_1 = \delta_1 / \mu_1 = 0,03 / 0,1 = 0,3 \text{ мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}), \text{ железобетон,}$$

$$G_2 = \delta_2 / \mu_2 = 0,5 / 0,2 = 2,5 \text{ мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}), \text{ минвата,}$$

- для варианта *a*: $G_1 < G_2 = 0,3 < 2,5$, и можно предположить, что после слоя железобетона водяные пары легко преодолеют слой минеральной ваты;

- для варианта *б*: $G_2 > G_1 = 2,5 > 0,3$, и можно предположить, что перед слоем железобетона произойдет торможение водяных паров, их накопление, и возрастет вероятность конденсации.

Таким образом, путем сопоставления паропроницаемости слоев, не прибегая к детальным расчетам, можно предположить, что расположение слоев по варианту *б* является проблемным.

В многослойных ограждающих конструкциях перенос водяного пара через материальные слои не столь очевиден, как в двуслойных. В многослойных ограждениях чередуются участки как безусловного переноса водяного пара, если $G_i < G_{i+1}$, так и участки его торможения, если $G_i > G_{i+1}$. В реальных

ограждающих конструкциях такая ситуация является типичной, потому что проектирование ограждений ведется, как правило, с позиции энергосбережения, без учета паропроницаемости слоев.

В таблице 4.4 приведены соотношения паропроницаемости слоев некоторых ограждающих конструкций, которые детально исследованы в предыдущих разделах.

Таблица 4.4

Соотношения паропроницаемости слоев ограждающих конструкций

№	Ограждающая конструкция	Соотношения паропроницаемости материальных слоев	Температура начала конденсации $t_{нк}$, °С
1	Однослойная из кирпича	$G = 0,14$	-13
2	С тонким слоем наружной штукатурки	$8 > 0,44 < 3,0 < 4,4$	-10
3	С утеплителем из минваты и наружным слоем из кирпича	$0,29 < 3,2 > 0,92$	-3
4	С утеплителем из монолитного пенобетона	$6 > 0,56 < 1,67 > 1,17$	-4
5	С утеплителем из экструдированного пенополистирола	$22 > 0,3 > 0,06 < 0,92 < 53,7$	-15

Как видно из таблицы 4.4, соотношения паропроницаемости ни у одной конструкции не соответствуют неравенству (4.2). Эти несоответствия существуют в разных участках поперечного сечения ограждающих конструкций. Несоответствие со стороны внутренней поверхности ограждения (в его теплой зоне) практически не влияет на эксплуатационные свойства ограждений. Температура начала конденсации остается сравнительно низкой (конструкции № 2 и 5). Несоответствия со стороны наружной поверхности ограждения (в его холодной зоне), особенно, перед наружным облицовочным слоем, проявляются в повышении температуры начала конденсации и, как следствие, в увеличении продолжительности периода влагонакопления и количества конденсации (конструкции № 3 и 4).

На стадии проектирования теплозащиты ограждающих конструкций существует возможность формировать соотношения паропроницаемости слоев в соответствии с неравенством (4.2) без снижения теплозащиты, путем изменения толщины слоев (δ) или подбора материалов слоев с требуемым значением паропроницаемости (μ).

Пример 4.2. Привести в соответствие с неравенством (4.2) соотношение паропроницаемости слоев ограждающей конструкции № 3 из таблицы 4.4, с сохранением уровня ее теплозащиты.

Решение. Существующее соотношение паропроницаемости слоев $0,29 < 3,2 > 0,92$ требует снижения паропроницаемости слоя утеплителя (3,2) и увеличения паропроницаемости наружного облицовочного слоя (0,92). Для

этих целей заменим минвату ($\lambda_2 = 0,042 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\mu_2 = 0,32 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$) на пенополистирол ($\lambda_2 = 0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\mu_2 = 0,05 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$), а также заменим керамический кирпич ($\lambda_3 = 0,7 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\mu_3 = 0,11 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$) на трепельный кирпич ($\lambda_3 = 0,41 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\mu_3 = 0,23 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$), не изменяя толщину слоев. Получим новые значения паропроницаемости слоев:

$$G_1 = \frac{\mu_1}{\delta_1} = \frac{0,11}{0,38} = 0,29 \text{ мг/}\left(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}\right), G_2 = \frac{\mu_2}{\delta_2} = \frac{0,05}{0,1} = 0,5 \text{ мг/}\left(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}\right),$$

$$G_3 = \frac{\mu_3}{\delta_3} = \frac{0,23}{0,12} = 1,9 \text{ мг/}\left(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}\right); 0,29 < 0,5 < 1,9.$$

Новое соотношение паропроницаемости слоев соответствует как неравенству (4.2), так и выражению (4.3):

$$G_3/G_1 = 1,9/0,29 = 6,5, \text{ то есть больше 5.}$$

После замены материалов двух слоев сопротивление теплопередаче не уменьшилось:

$$R_{\text{то}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_1^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{0,1}{0,04} + \frac{0,12}{0,41} + \frac{1}{23} = 3,48 \text{ м}\cdot\text{°С/Вт}.$$

Соответствие паропроницаемости слоев измененной ограждающей конструкции неравенству (4.2) позволяет предположить, что температура начала конденсации снизится, вследствие чего снизится количество конденсата и его негативное влияние на ограждающую конструкцию.

Для проверки этого предположения выполнен расчет температуры начала конденсации. Расчетная схема осталась прежней (рис. 3.4).

$$t_{\text{в}} = 20^\circ\text{С}, \varphi_{\text{в}} = 50\%, E_{\text{в}} = 2338 \text{ Па}, e_{\text{в}} = 0,50 \cdot 2338 = 1169 \text{ Па}.$$

Вспомогательные расчеты:

$$R_{\text{пк}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = \frac{0,38}{0,11} + \frac{0,1}{0,05} + \frac{0,12}{0,23} = 5,97 \left(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}\right)/\text{мг},$$

$$R_{\text{т, 2/3}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,7} + \frac{0,1}{0,04} = 3,15 \left(\text{м}^2\cdot\text{°С}\right)/\text{Вт},$$

$$R_{\text{т, 3/н}} = R_{\text{то}} - R_{\text{тн}} = 3,48 - 0,04 = 3,44 \left(\text{м}^2\cdot\text{°С}\right)/\text{Вт}.$$

Расчет разности давлений ($E-e$) в сечении 2/3 при трех температурах наружного воздуха в условиях Казани:

$$1) \quad \text{Среднегодовая: } t_{\text{н}} = +4,2^\circ\text{С}, \varphi_{\text{н}} = 76\%, E_{\text{н}} = 825 \text{ Па},$$

$$e_{\text{н}} = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па},$$

$$\tau_{\text{в}} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{то}}} \cdot R_{\text{тв}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,48} \cdot 0,11 = 19,5^\circ\text{С}, E_{\text{вп}} = 2266 \text{ Па},$$

$$e_{\text{вп}} = 0,5 \cdot 2266 = 1133 \text{ Па}.$$

$$\tau_H = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{TO}} \cdot R_{T,3/H} = 20 - \frac{20-4,2}{3,48} \cdot 3,44 = 4,4 \text{ }^\circ\text{C}, \quad E_{\text{III}} = 836 \text{ Па},$$

$$e_{\text{III}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па},$$

$$G_K = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{III}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1133 - 635}{5,97} = 83 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}),$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_B - e_{\text{ВП}}}{G_K} = \frac{1169 - 1133}{83} = 0,43 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_H - e_{\text{III}}}{G_K} = \frac{635 - 627}{83} = 0,09 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,43 + 5,97 + 0,09 = 6,49 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{П},2/3} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} = 0,43 + \frac{0,38}{0,11} + \frac{0,1}{0,05} = 5,88 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$\tau_{2/3} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{TO}} \cdot R_{T,2/3} = 20 - \frac{20-4,2}{3,48} \cdot 3,15 = 5,7 \text{ }^\circ\text{C}, \quad E_{2/3} = 916 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},2/3} = 1169 - \frac{1169 - 627}{6,49} \cdot 5,88 = 678 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{2/3} - e_{2/3}) = 916 - 678 = 238 \text{ Па}.$

2) Среднемесячная января: $t_H = -11,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_H = 80\%$, $E_H = 225 \text{ Па}$,

$$e_H = 180 \text{ Па},$$

$$\tau_{2/3} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{TO}} \cdot R_{T,2/3} = 20 - \frac{20+11,6}{3,48} \cdot 3,15 = -8,6 \text{ }^\circ\text{C}, \quad E_{2/3} = 293 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},2/3} = 1169 - \frac{1169 - 180}{6,49} \cdot 5,88 = 273 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{2/3} - e_{2/3}) = 293 - 273 = 20 \text{ Па}.$

3) Среднемесячная января, пониженная на среднесуточную амплитуду: $t_H = -21,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_H = 84\%$, $E_H = 87 \text{ Па}$, $e_H = 0,84 \cdot 87 = 73 \text{ Па}.$

$$\tau_{2/3} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{TO}} \cdot R_{T,2/3} = 20 - \frac{20+21,8}{3,48} \cdot 3,15 = -17,8 \text{ }^\circ\text{C}, \quad E_{2/3} = 128 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},2/3} = 1169 - \frac{1169 - 73}{6,49} \cdot 5,88 = 176 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{2/3} - e_{2/3}) = 128 - 176 = -48 \text{ Па}.$

Результаты расчета обновленной ограждающей конструкции № 3 представлены на рисунке 4.3 в сравнении с первоначальным вариантом этой конструкции.

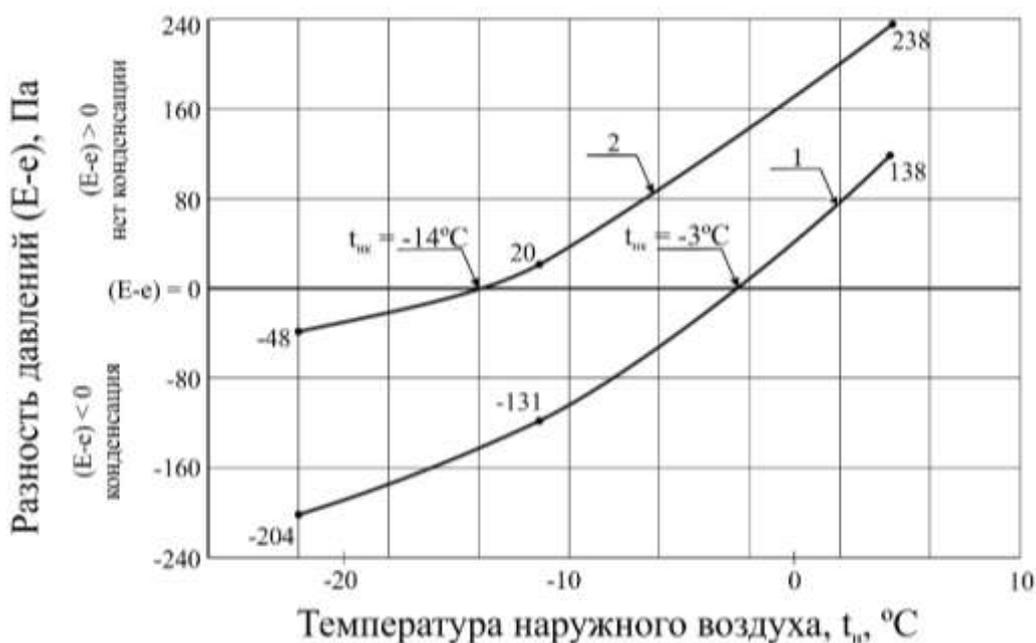


Рис. 4.3. Зависимость $(E-e)$ от t_n в сечении 2/3 первоначального варианта ограждающей конструкции № 3 (1) и обновленного варианта (2)

Из рисунка 4.3 видно, что у обновленного варианта ограждающей конструкции № 3 $t_{нк} = -14^\circ\text{C}$, а это ниже первоначального варианта более чем на 10°C .

Таким образом, формирование соотношения паропроницаемости слоев в соответствии с неравенством (4.2) обеспечивает более свободное прохождение водяного пара через ограждающие конструкции, снижение температуры начала конденсации, и, соответственно, негативное воздействие конденсации на эксплуатационные свойства ограждающих конструкций.

4.3. Влияние наружных слоев

Наружные слои должны быть достаточно пористыми, чтобы обеспечить прохождение через них водяного пара и одновременно достаточно плотными, чтобы защитить ограждающие конструкции от неблагоприятного погодного фактора. Это противоречие и является основной трудностью при проектирова-

нии сплошных (без воздушных прослоек) многослойных ограждающих конструкций [34–37].

Решение указанного противоречия затруднено ограниченной номенклатурой материалов для наружных слоев и ограниченным диапазоном их свойств (толщиной слоев и коэффициентом паропроницаемости). Для наружных слоев сплошных наружных стен массовое применение получили штукатурка и кирпичная кладка. Для штукатурки используются как традиционные растворы (цементные, цементно-известковые, известковые, поризованные), так и различные виды сухих строительных смесей. Толщина штукатурки составляет от 5 до 20 мм, а коэффициенты паропроницания штукатурки от 0,02 до 0,12 мг/(м·ч·Па). Кирпичная кладка выполняется из кирпича различных типов (сплошные керамические и силикатные кирпичи; пустотелые кирпичи различной плотности от 1000 до 1600 кг/м³, облицовочные и лицевые кирпичи). Толщина кирпичной кладки ограничена размерами кирпича, как правило, 120 мм, реже – 250 мм и коэффициентами паропроницаемости кирпичной кладки от 0,11 до 0,17 мг/(м·ч·Па).

Узкая номенклатура и ограниченный диапазон свойств материалов наружных слоев затрудняет проектирование ограждающих конструкций. Основная трудность заключается в подборе оптимального соотношения паропроницаемости материальных слоев ограждения, которое бы исключало (или сводило к минимуму) торможение водяного пара перед наружным слоем, потому что наружный слой находится в зоне низких температур наружного воздуха, а торможение водяного пара приводит к его накоплению, повышению относительной влажности до 100% и конденсации.

Известны теоретические и экспериментальные исследования этой проблемы [28,29,34,38–41], в которых показано, что с увеличением торможения водяного пара перед наружным слоем повышается температура начала конденсации $t_{нк}$. Для проверки влияния наружных слоев на температуру начала конденсации ограждающих конструкций рассмотрим наиболее применяемые виды наружных слоев, которые последовательно объединяются с основной конструкцией ограждений (рис. 4.4).

Основная конструкция ограждения состоит из внутренней цементной штукатурки, кладки из силикатного кирпича и утеплителя из минеральной ваты. В качестве наружных слоев использованы: влаговетрозащитная пленка

«Изоспан А», штукатурка из сухих смесей Ceresit СТ-190 толщиной 5 и 10 мм, кладка из керамического кирпича толщиной 120 и 250 мм.

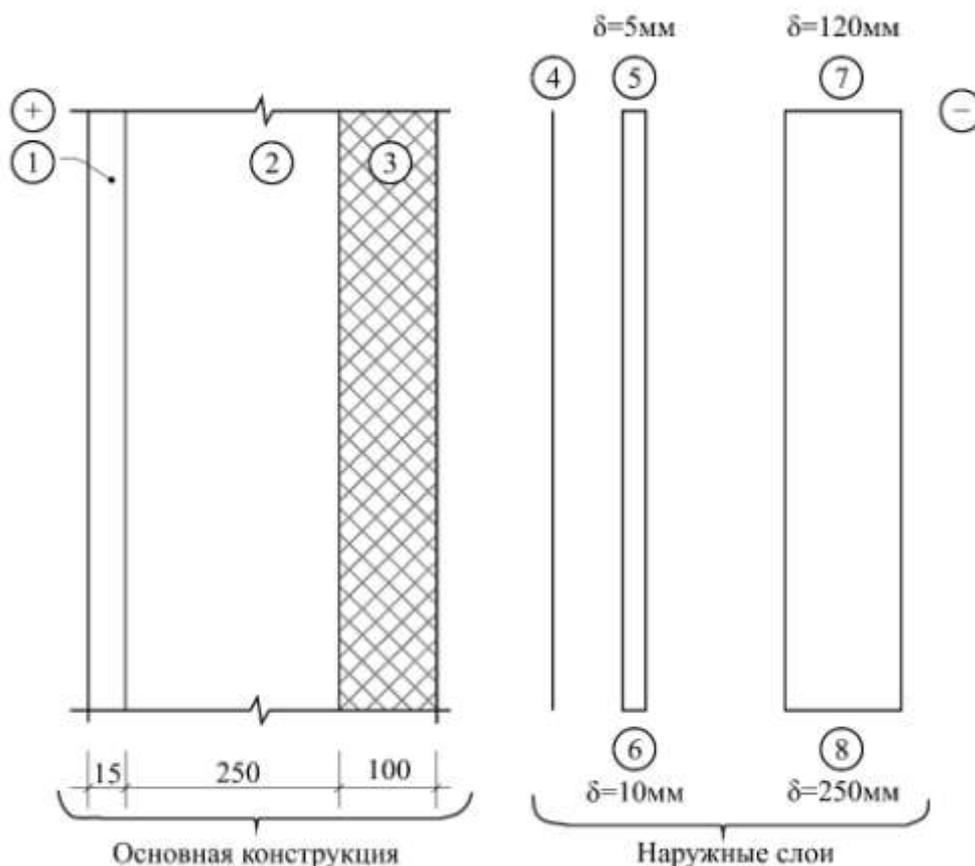


Рис. 4.4. Схема основной конструкции ограждения и наружных слоев

Параметры слоев

1. Цементно-песчаный раствор: $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_1 = 0,93 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
 $\mu_1 = 0,09 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_1 = 15 \text{ мм}$; $G_1 = 0,09/0,015 = 6 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
2. Силикатный кирпич: $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_2 = 0,87 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$,
 $\mu_2 = 0,11 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$, $\delta_2 = 250 \text{ мм}$, $G_2 = 0,11/0,25 = 0,44 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
3. Минеральная вата: $\rho_0 = 90 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_3 = 0,041 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
 $\mu_3 = 0,3 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_3 = 100 \text{ мм}$; $G_3 = 0,3/0,1 = 3 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
4. Влаговетрозащитная мембрана «Изоспан А»: $\delta_4 = 0,45 \text{ мм}$;
 $R_{\text{п}} = 0,016 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг}$; $G_1 = 1/R_{\text{п}} = 1/0,016 = 62 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
5. Штукатурка из сухой смеси Ceresit СТ-190: $\lambda_5 = 0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
 $\mu_5 = 0,02 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_5 = 5 \text{ мм}$; $G_5 = 0,02/0,005 = 4 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
6. То же, толщиной 10 мм: $G_6 = 0,02/0,01 = 2 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,

7. Керамический кирпич: $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_7 = 0,58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
 $\mu_7 = 0,14 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_7 = 120 \text{ мм}$; $G_7 = 0,14/0,12 = 1,167 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
8. То же, толщиной 250 мм: $G_8 = 0,14/0,25 = 0,56 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

Объединением основной конструкции с каждым наружным слоем получено шесть вариантов ограждающих конструкций с определенными соотношениями паропроницаемости слоев.

Вариант 1, основная конструкция без наружного слоя, $6 > 0,44 < 3 < \infty$

Вариант 2, основная конструкция и «Изоспан А», $6 > 0,44 < 3 < 62$

Вариант 3, основная конструкция и 5 мм штукатурки, $6 > 0,44 < 3 < 4$

Вариант 4, основная конструкция и 10 мм штукатурки, $6 > 0,44 < 3 > 2$

Вариант 5, основная конструкция и 120 мм кладки, $6 > 0,44 < 3 > 1,167$

Вариант 6, основная конструкция и 250 мм кладки, $6 > 0,44 < 3 > 0,56$.

Можно предположить, что в ограждающих конструкциях по вариантам 1 и 2 будет самая низкая температура начала конденсации $t_{\text{НК}}$, потому что паропроницаемость наружных слоев намного превышает паропроницаемость предыдущих (например, $3 < 62$). В ограждающих конструкциях по вариантам от 4 до 6 $t_{\text{НК}}$ должна повышаться, потому что паропроницаемость наружных слоев ниже предыдущих, и следует ожидать торможение водяного пара, его накопление перед наружным слоем и конденсацию.

Расчет $t_{\text{НК}}$ для всех вариантов ограждающих конструкций приведен в Приложении 2, а обобщенные результаты – в таблице 4.5.

Из таблицы 4.5 видно, что с увеличением сопротивления паропроницаемости наружного слоя (столбец 4) повышается температура начала конденсации $t_{\text{НК}}$ (столбец 6). Это можно объяснить торможением водяного пара, его накоплением перед наружным слоем и ростом относительной влажности до 100%, и начинается конденсация.

Таблица 4.5

**Влияние параметров наружных слоев
на температуру начала конденсации $t_{\text{НК}}$**

№ варианта	Наружный слой			Соотношения паропроницаемости материальных слоев	$t_{\text{НК}}, \text{°C}$
	Материал	Толщина, мм	Сопротивление паропроницанию $R_{\text{ПНС}}, \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/мг}$		
1	2	3	4	5	6
1	Нет	-	-	$6 > 0,44 < 3 < \infty$	-25
2	Изоспан	0,45	0,016	$6 > 0,44 < 3 < 62$	-20
3	Штукатурка	5	0,25	$6 > 0,44 < 3 < 4$	-9
4	Штукатурка	10	0,5	$6 > 0,44 < 3 > 2$	-5
5	Кирпич	120	0,86	$6 > 0,44 < 3 > 1,167$	-3
6	Кирпич	250	1,78	$6 > 0,44 < 3 > 0,56$	0

4.4. Влияние сопротивления паропрооницанию ограждения

В соответствии с формулой (1.2) поток водяного пара через ограждение G возрастает при увеличении разности парциальных давлений водяного пара внутри и снаружи помещения и снижается при увеличении сопротивления паропрооницанию ограждающей конструкции $R_{ПК}$:

$$G = \frac{e_B - e_H}{R_{ПК}}, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) .$$

Как было показано в разделе 1.2, сопротивление паропрооницанию не регламентируется нормативными документами, поэтому в реальных проектных решениях может изменяться в широких пределах, например, от 3 до 20 ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг (табл. 3.2). Разность давлений водяного пара ($e_B - e_H$) в зимний период, например, в условиях Казани может достигать 1000 Па, поэтому поток водяного пара через ограждение будет изменяться от $1000/3 = 333$ мг/($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$) до $1000/20 = 50$ мг/($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$). Количество конденсата в ограждении при потоке 333 мг может оказаться в 6 раз больше, чем при 50 мг, что негативно отразится на эксплуатационных свойствах ограждений.

В связи с изложенным можно предположить, что чем выше $R_{ПК}$, тем ниже будет поток водяного пара через ограждение G , тем меньше конденсата накопится в ограждении и ниже будет температура начала конденсации $t_{НК}$. Однако анализ соотношений между $R_{ПК}$ и $t_{НК}$ ограждающих конструкций, параметры которых приведены в примерах 3.3 и 3.4, в таблице 3.2 и в Приложении 2, не выявили прямой зависимости между этими параметрами (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Соотношение между $R_{ПК}$ и $t_{НК}$ различных ограждающих конструкций

№	$R_{ПК}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$	$t_{НК}, ^\circ\text{C}$	№	$R_{ПК}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$	$t_{НК}, ^\circ\text{C}$
1	21,15	-15	8	3,27	-5
2	8,03	-11	9	3,02	-9
3	7,0	-13	10	2,95	-10
4	4,85	-3	11	2,79	-20
5	4,55	0	12	2,78	-1
6	4,445	-8	13	2,77	-25
7	3,63	-5	14	2,45	+2

Анализ таблицы 4.6 показывает, что зависимость $t_{НК}$ от параметров ограждающих конструкций, их конструктивного решения и использованных материалов носит более сложный характер.

В работе [21] исследована зависимость $t_{НК}$ от сопротивления паропрооницаемости наружных слоев $R_{ПНС}$ для двух ограждающих конструкций, сопротивления паропрооницаемости которых различаются более чем в два раза:

$R_{ПК} = 2,8(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$ и $R_{ПК} = 6,5(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$. Установлено, что $t_{НК}$ повыша-

ется с ростом $R_{\text{ПНС}}$ у обеих конструкций, однако в ограждении с более высоким сопротивлением паропрооницанию повышение $t_{\text{НК}}$ происходит медленнее. При одинаковых значениях $R_{\text{ПНС}}$ в ограждении с $R_{\text{ПК}} = 6,5 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}$ $t_{\text{НК}}$ оказывается ниже на $5-7^\circ\text{C}$, чем в ограждении с $R_{\text{ПК}} = 2,8 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}$, что можно объяснить снижением доли $R_{\text{ПНС}}$ в сопротивлении паропрооницаемости ограждающей конструкции $R_{\text{ПК}}$.

Таким образом, установлено, что $t_{\text{НК}}$ зависит не только от $R_{\text{ПНС}}$, но также и от $R_{\text{ПК}}$, а совместное влияние $R_{\text{ПНС}}$ и $R_{\text{ПК}}$ на величину $t_{\text{НК}}$ определяется долей $R_{\text{ПНС}}$ в общем сопротивлении паропрооницанию ограждающей конструкции $R_{\text{ПК}}$.

Для проверки этого предположения изменено сопротивление паропрооницанию основной конструкции $R_{\text{ПОК}}$ в вариантах 4 и 5, рассмотренных в разделе 4.3, как в сторону увеличения $R_{\text{ПОК}}$, так и в сторону его снижения от первоначального значения $R_{\text{ПОК}} = 2,77 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}$.

В варианте 4 увеличена кирпичная кладка с 250 мм до 380 мм (вариант 4+) и заменена кирпичная кладка 250 мм на керамзитобетон той же толщины, $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,33 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$; $\mu = 0,14 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$ (вариант 4-).

В варианте 5 заменена кирпичная кладка 250 мм на монолитный железобетон 200 мм, $\rho_0 = 2500 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 2,04 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$; $\mu = 0,03 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$ (вариант 5+) и кирпичная кладка 250 мм – на кладку из газобетонных блоков той же толщины, $\rho_0 = 400 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,14 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$; $\mu = 0,23 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$ (вариант 5-).

Таким образом, получены четыре дополнительных варианта ограждающих конструкций с различными значениями $R_{\text{ПОК}}$ и теми же значениями $R_{\text{ПНС}}$, которые использованы в основных вариантах 4 и 5.

Расчет новых вариантов ограждающих конструкций приведен в Приложении 2, а итоги расчета представлены в обобщенной таблице 4.7 в виде сопротивления паропрооницанию конструкций ограждения $R_{\text{ПК}}$ (столбец 3), сопротивления паропрооницанию наружного слоя $R_{\text{ПНС}}$ (столбец 4), доли $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$, выраженной в процентах (столбец 5), и соответствующая этой доле температура начала конденсации ограждающей конструкции $t_{\text{НК}}$ (столбец 6). В этой же таблице приведены аналогичные результаты расчета по вариантам 1-6 (из

Приложения 2) и результаты расчета ограждающих конструкций, представленные в Приложении 1 и примерах 3.3 и 3.4.

Таблица 4.7

Параметры исследуемых ограждающих конструкций

№	Ограждающие конструкции и наружный слой	Сопротивление паропроницанию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$		Доля $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$, %	$t_{\text{НК}}$, °C
		огр. $R_{\text{ПК}}$	нар. слоя $R_{\text{ПНС}}$		
1	2	3	4	5	6
1	Вариант 1, без нар. слоя	2,77	0	0	-25
2	Вариант 2, Изоспан А	2,79	0,016	0,6	-20
3	Вариант 3, штукатурка, 5 мм	3,02	0,25	8,3	-9
4	Вариант 4, штукатурка, 10 мм	3,27	0,5	15,3	-5
5	Вариант 5, кирпич, 120 мм	3,63	0,86	23,7	-3
6	Вариант 6, кирпич, 250 мм	4,55	1,78	39,1	0
7	Вариант 4-, штукатурка, 10 мм	2,78	0,5	18,0	-1
8	Вариант 4+, штукатурка, 10 мм	4,45	0,5	11,2	-8
9	Вариант 5-, кирпич, 120 мм	2,45	0,86	35,1	+2
10	Вариант 5+, кирпич, 120 мм	8,03	0,86	10,7	-11
11	С утеплителем из экструдированного пенополистирола, керамический кирпич 120 мм и поризованная штукатурка, 8 мм	21,15	1,11	5,2	-15
12	С тонким слоем наружной штукатурки из Ceresit СТ-190, 5 мм	2,95	0,225	7,6	-10

1	2	3	4	5	6
13	С утеплителем из минваты и наружным слоем из керамического кирпича, 120 мм	4,85	1,09	22,5	-3
14	С утеплителем из монолитного пенобетона и наружным слоем из керамического эффективного кирпича, 120 мм	3,41	0,86	25,2	-4

Результаты расчета параметров представлены в таблице 4.7 по группам исследованных ограждающих конструкций, поэтому трудно проследить связь между долей $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$ (столбец 5) и температурой начала конденсации $t_{\text{НК}}$ (столбец 6). Эта зависимость становится очевидной, если ее представить графически (рис. 4.5). Из рисунка видно, что расчетные точки по всем ограждающим конструкциям с некоторыми отклонениями формируют устойчивый тренд зависимости $t_{\text{НК}}$ от доли $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$.

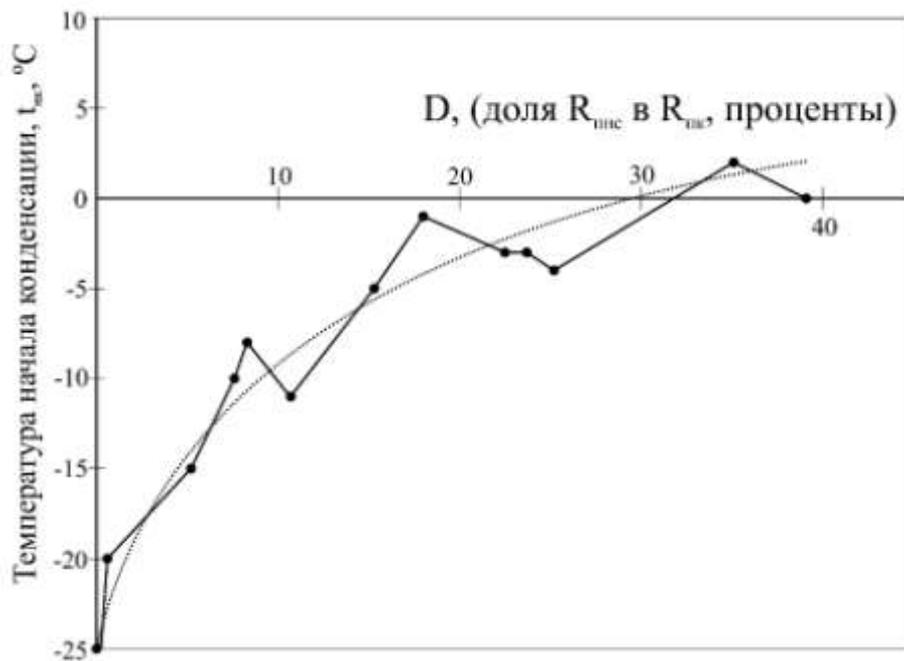


Рис. 4.5. Зависимость температуры начала конденсации $t_{\text{НК}}$ от доли $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$ в процентах

Таким образом, определены основные параметры ограждающих конструкций и их соотношения, от которых значимо зависит температура начала конденсации водяного пара в ограждениях.

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ОГРАНИЧЕНИЕМ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА

В предыдущих разделах было установлено, что каждая ограждающая конструкция имеет собственную температуру начала конденсации водяного пара $t_{\text{НК}}$. Этот параметр ограждающих конструкций определяется конструктивным решением ограждения и использованными материалами и является своеобразным индикатором их увлажнения конденсированной влагой в заданных климатических условиях [21, 46–50].

В осенне-зимний период года, когда температура наружного воздуха $t_{\text{Н}}$ неуклонно снижается, она может стать равной $t_{\text{НК}}$ ограждающей конструкции, и в плоскости максимального увлажнения ограждения возникает конденсация водяного пара. То есть $t_{\text{НК}}$ ограждающей конструкции делит температурную шкалу места строительства на две части. При $t_{\text{Н}}$ выше $t_{\text{НК}}$ в ограждении не возникает конденсация водяного пара, а при $t_{\text{Н}}$, равной и ниже $t_{\text{НК}}$, в ограждении конденсируется водяной пар.

Таким образом, основой оценки увлажнения ограждающих конструкций конденсированной влагой является сопоставление $t_{\text{НК}}$ ограждения с годовым ходом температуры наружного воздуха $t_{\text{Н}}$ места строительства.

Метод определения $t_{\text{НК}}$ ограждающих конструкций детально описан в разделе 3, а в разделе 4 установлена зависимость $t_{\text{НК}}$ от конструктивного решения ограждений и использованных материалов, точнее, от доли сопротивления паропроницанию наружного слоя $R_{\text{ПНС}}$ в сопротивлении паропроницанию ограждающей конструкции в целом $R_{\text{ПК}}$. Зависимость от доли $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$ была представлена на рисунке 4.5.

Математическая обработка данных таблицы 4.7, на основании которых построен рисунок 4.5, позволила получить регрессионное уравнение зависимости $t_{\text{НК}} = f(D)$, где D представляет собой долю $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$ (в процентах):

$$t_{\text{НК}} = -0,022 \cdot D^2 + 1,3904 \cdot D - 21,586 \quad . \quad (5.1)$$

Достоверность аппроксимации 0,924.

Уравнение (5.1) позволяет по конструктивному решению ограждения и использованных материалов определять его $t_{\text{НК}}$ по доле $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$ (D).

Пример 5.1. *Определить $t_{\text{НК}}$ ограждающей конструкции, состоящей из внутренней цементно-известковой штукатурки, керамических пустотелых камней «Поротерм 51» и наружного слоя из полнотелого керамического кирпича.*

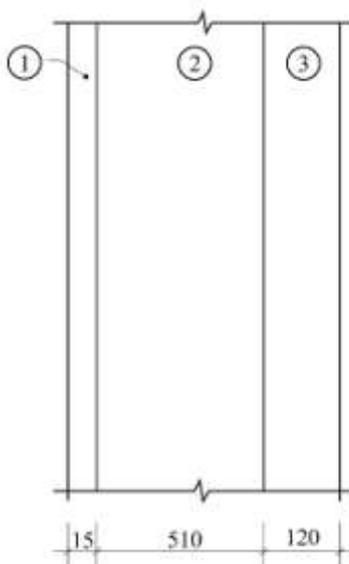


Рис. 5.1. Расчетная схема

Параметры слоев:

1 – цементно-известковая
штукатурка $\lambda = 0,7 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$,

$\mu = 0,093 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$

2 – «Поротерм 51», $\rho_0 = 750 \text{ кг/м}^3$,
 $\lambda = 0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, $\mu = 0,095 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$

3 – керамический полнотелый
кирпич $\lambda = 0,52 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$,

$\mu = 0,11 \text{ мг/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{0,015}{0,093} + \frac{0,51}{0,095} + \frac{0,12}{0,11} = 0,16 + 5,37 + 1,09 = 6,62 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}$$

$$R_{\text{ПНС}} = \frac{0,12}{0,11} = 1,09 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}$$

Доля $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}$:

$$\left(\frac{R_{\text{ПНС}}}{R_{\text{ПК}}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{1,09}{6,62} \right) \cdot 100 = 16,5\%$$

Температура начала конденсации $t_{\text{НК}}$:

$$t_{\text{НК}} = -0,022 \cdot 16,5^2 + 1,3904 \cdot 16,5 - 21,586 = -4,6 \text{ °С}$$

Определим $t_{\text{НК}}$ по методу раздела 3.

$$R_{\text{ТО}} = 0,11 + \frac{0,015}{0,7} + \frac{0,51}{0,15} + \frac{0,12}{0,52} + 0,04 = 0,11 + 0,021 + 3,4 + 0,23 + 0,04 = 3,80 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°С} \right) / \text{Вт}$$

$$R_{\text{Т,2/3}} = 0,11 + 0,021 + 3,4 = 3,53 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°С} \right) / \text{Вт}$$

$$R_{\text{Т,3/Н}} = 0,11 + 0,021 + 3,4 + 0,23 = 3,76 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°С} \right) / \text{Вт}$$

$$\tau_{\text{В}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,8} \cdot 0,11 = 19,5 \text{ °С}, E_{\text{ВП}} = 2266 \text{ Па}, e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2266 = 1133 \text{ Па},$$

$$\tau_{\text{Н}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,8} \cdot 3,76 = 4,4 \text{ °С}, E_{\text{НП}} = 836 \text{ Па}, e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па},$$

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1133 - 635}{6,62} = 75,2 \text{ мг} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right),$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1133}{75,2} = 0,48 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{75,2} = 0,11 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг},$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,48 + 6,62 + 0,11 = 7,21 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг}.$$

Разность $(E-e)$ в плоскости максимального увлажнения (сечение 2/3) при трех температурах наружного воздуха:

$$t_{\text{н}} = +4,2^{\circ}\text{C}, \varphi_{\text{н}} = 76\%, E_{\text{в}} = 825 \text{ Па}, e_{\text{в}} = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па},$$

$$\tau_{2/3} = 20 - \frac{20-4,2}{3,8} \cdot 3,53 = 5,3^{\circ}\text{C}, E_{2/3} = 892 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = 1169 - \frac{1169-627}{7,21} \cdot 6,01 = 717 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E-e) = 1169 - 717 = 175 \text{ Па}$.

$$t_{\text{н}} = -11,6^{\circ}\text{C}, \varphi_{\text{н}} = 80\%, E_{\text{в}} = 225 \text{ Па}, e_{\text{в}} = 0,8 \cdot 225 = 180 \text{ Па},$$

$$\tau_{2/3} = 20 - \frac{20+11,6}{3,8} \cdot 3,53 = -9,3^{\circ}\text{C}, E_{2/3} = 276 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = 1169 - \frac{1169-180}{7,21} \cdot 6,01 = 345 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E-e) = 276 - 345 = -69 \text{ Па}$.

$$t_{\text{н}} = -21,8^{\circ}\text{C}, \varphi_{\text{н}} = 84\%, E_{\text{в}} = 87 \text{ Па}, e_{\text{в}} = 0,84 \cdot 87 = 73 \text{ Па},$$

$$\tau_{2/3} = 20 - \frac{20+21,8}{3,8} \cdot 3,53 = -18,8^{\circ}\text{C}, E_{2/3} = 116 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = 1169 - \frac{1169-73}{7,21} \cdot 6,01 = 255 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E-e) = 116 - 255 = -139 \text{ Па}$.

На рисунке 5.2 приведена зависимость разности давлений $(E-e)$ в плоскости максимального увлажнения от температуры наружного воздуха, из которой следует, что температура начала конденсации $t_{\text{нк}} = -5^{\circ}\text{C}$.

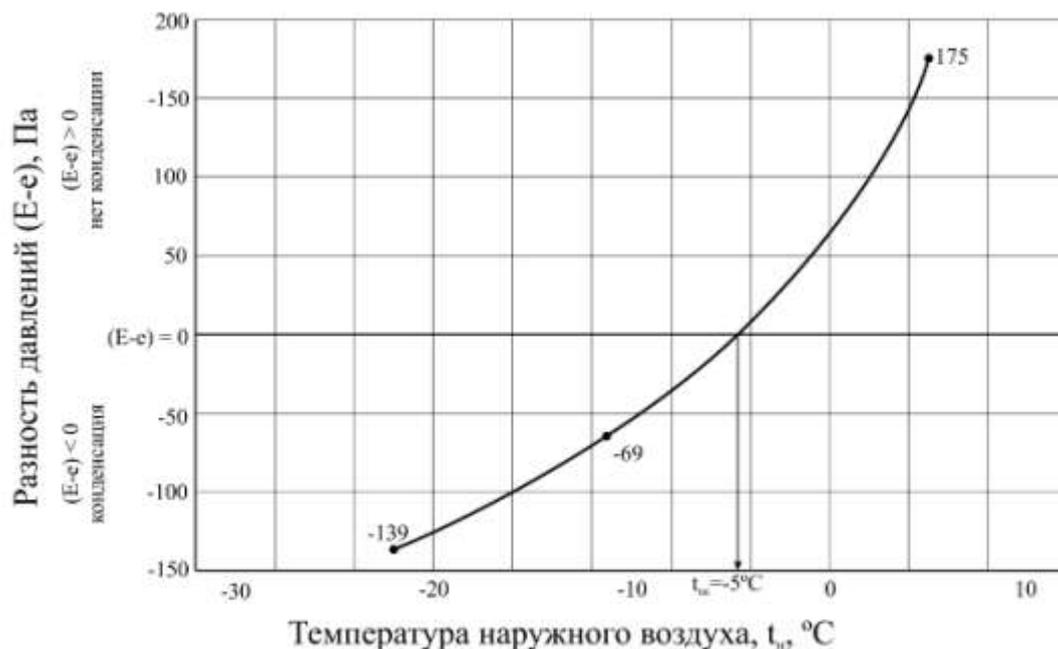


Рис. 5.2. Температура начала конденсации $t_{\text{нк}} = -5^{\circ}\text{C}$

При сравнении $t_{\text{НК}}$, определенной по формуле (5.1) и по графику 5.2, видно, что они различаются на $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это различие дает возможность использования формулы (5.1) для определения $t_{\text{НК}}$ при проектировании ограждающих конструкций.

При проектировании ограждающих конструкций основной трудностью является обоснованный выбор величины $t_{\text{НК}}$, которая ограничит накопление конденсата в эксплуатации. Этот выбор должен быть основан на сопоставлении $t_{\text{НК}}$ проектируемой ограждающей конструкции с годовым ходом температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$, оценки продолжительности возможной конденсации и количества конденсата [16].

Пример такого сопоставления представлен на рисунке 5.3, где приведено изменение среднемесячных температур наружного воздуха на протяжении года в условиях Казани в сопоставлении с $t_{\text{НК}}$ ограждающих конструкций, приведенных в таблице 3.2.

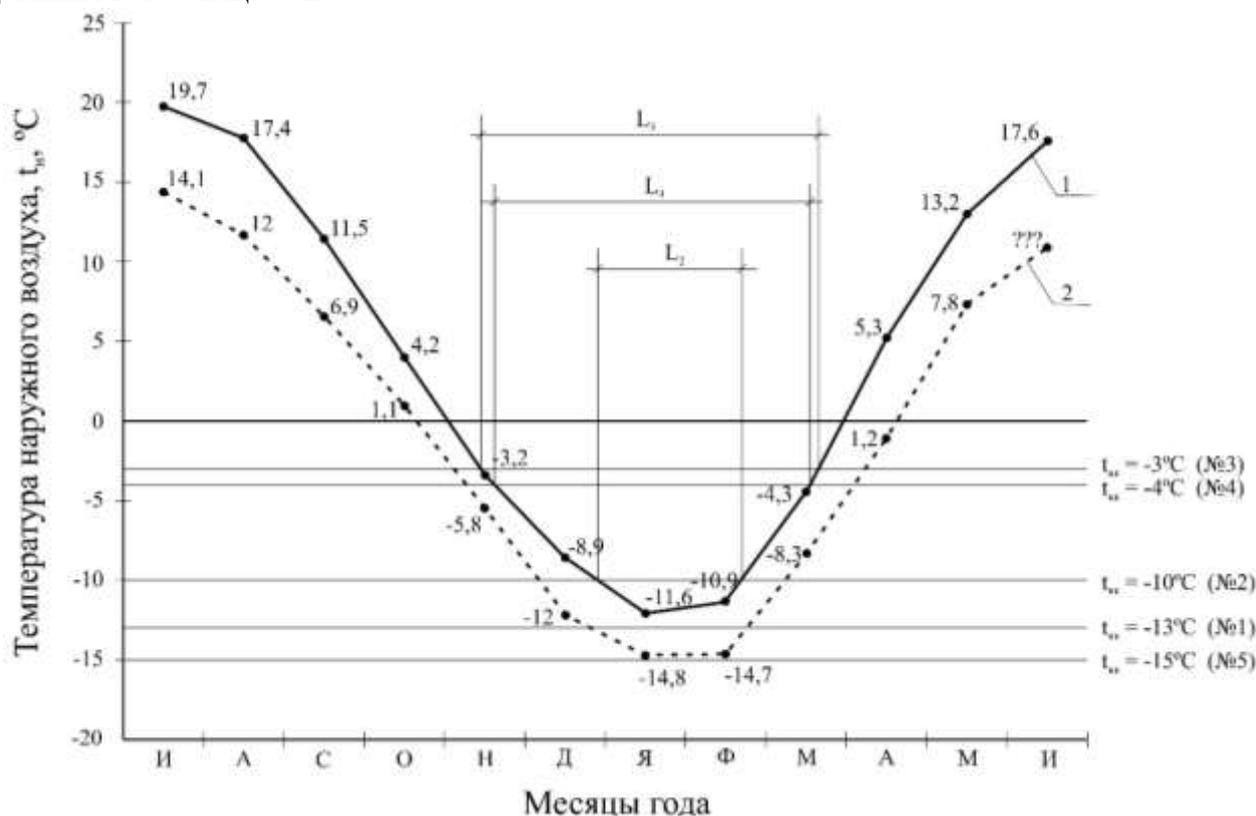


Рис. 5.3. Годовой ход температуры наружного воздуха в Казани в сопоставлении с $t_{\text{НК}}$ ограждающих конструкций из таблицы 3.2

1 – среднемесячные температуры; 2 – среднемесячные температуры, сниженные на среднесуточную амплитуду; № 1, 2 и т.д. – номера ограждающих конструкций по таблице 3.2; L_2 , L_3 и L_4 – продолжительность конденсации ограждающих конструкций № 2, 3 и 4

Из рисунка видно, что в ноябре среднемесячная температура наружного воздуха снижается до $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и становится равной: $t_{\text{НК}} = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ограждающей конструкции № 3, следовательно, в этом ограждении начинается конденсация водяного пара. Конденсация усиливается к январю и ослабевает к марту, а к

окончанию марта $t_{\text{н}}$ поднимается выше $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, и в ограждении прекратится конденсация водяного пара. Продолжительность периода конденсации в ограждении отмечена на рисунке как L_3 .

В ограждающей конструкции № 4 конденсация водяных паров начнется при $t_{\text{н}} = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$, в ограждении № 2 – при $t_{\text{н}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В ограждении № 1 при среднемесячных температурах конденсация не возникнет, так как температура января $-11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ расположена выше $t_{\text{нк}} = -13\text{ }^{\circ}\text{C}$, конденсация в этой ограждающей конструкции будет происходить при суточных амплитудах наружного воздуха и отдельных волнах холода. В ограждении № 5 конденсация возможна только за счет отдельных волн холода.

Из рисунка 5.3 следует также, что по мере снижения $t_{\text{нк}}$ ограждающих конструкций уменьшается продолжительность периода увлажнения $L_3 > L_4 > L_2$, и, следовательно, будет снижаться количество конденсата. Продолжительность периода конденсации можно определить из графика на рисунке 5.3 по пересечениям температурного хода наружного воздуха с $t_{\text{нк}}$ ограждающих конструкций.

Более того, продолжительность периода конденсации в часах можно определить по графику на рисунке 5.4, который построен для условий Казани по данным таблицы 3.3. На рисунке 5.4 представлена интегральная продолжительность действия температуры $t_{\text{н}}$, от минимального значения температуры наружного воздуха в месте строительства до величины $t_{\text{нк}}$ ограждающих конструкций. В связи с тем, что $t_{\text{нк}}$ по определению характеризует $t_{\text{н}}$, при которой в данном ограждении начинается конденсация водяного пара, шкала температур на рисунке 5.4 определена как $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{нк}}$.

График рисунка 5.4 позволяет определить продолжительность конденсации водяного пара в ограждающей конструкции по величине $t_{\text{нк}}$ в часах.

В температурной шкале наружного воздуха существует несколько характерных значений, которые с различной степенью вероятности описывают годовой ход температуры наружного воздуха. Наименования этих температур представлены в таблице 5.1 (столбец 2), а в столбцах 3 и 4 приведены значения этих температур и продолжительность их действия в условиях Казани. Столбцы 2 и 3 приняты по СП «Строительная климатология», «Тепловая защита зданий» и по [51], а столбец 4 определен по графику рисунка 5.4.

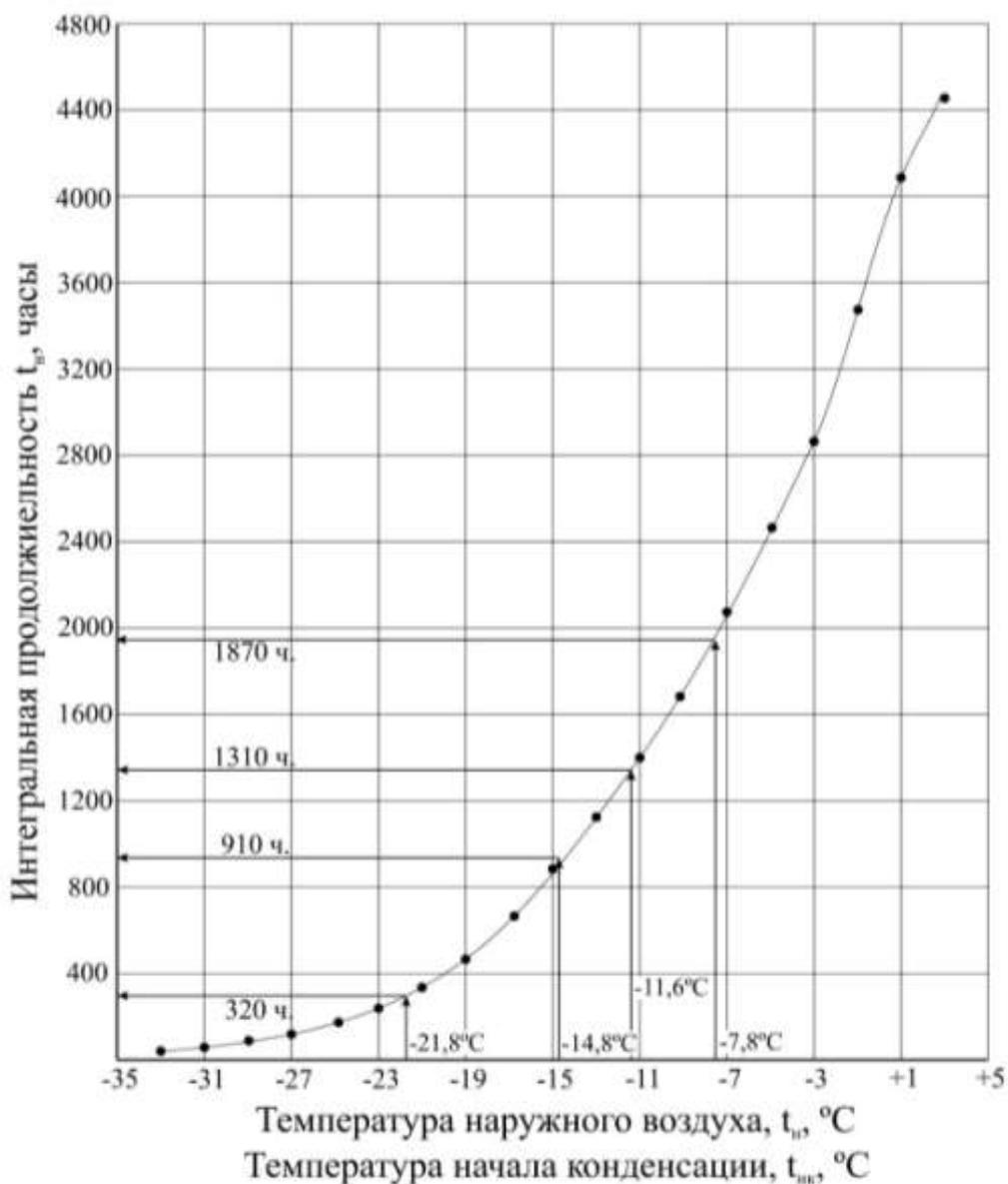


Рис. 5.4. Интегральная продолжительность конденсации наружного воздуха, часы (от минимального значения в месте строительства до значения t_n или $t_{нк}$ ограждающих конструкций)

Таблица 5.1

Характерные температуры наружного воздуха в условиях Казани

№	Наименование температуры	Характеристика температуры	
		Величина, °C	Продолжительность, часы
1	Средняя температура месяцев с отрицательными среднемесячными температурами	-7,8	1870
2	Среднемесячная температура наиболее холодного месяца (января)	-11,6	1310
3	Среднемесячная температура января, сниженная на среднесуточную амплитуду	-14,8	910
4	Среднемесячная температура января, сниженная на максимальную суточную амплитуду	-21,8	320
5	Минимальная температура места строительства продолжительностью действия не менее 1 часа	-33	18

При достаточном обосновании одна из характерных температур наружного воздуха может быть принята в качестве требуемой величины начала конденсации $t_{\text{НК}}$ при проектировании ограничения конденсации в ограждающей конструкции. Приняв одну из характерных температур в качестве $t_{\text{НК}}$, можно определить параметры ограждения, которые обеспечат эту величину $t_{\text{НК}}$. Для этого следует воспользоваться зависимостью, обратной уравнению (5.1), то есть вторым уравнением регрессии, которое получено математической обработкой данных таблицы 4.7 и представлены в виде зависимости требуемой доли $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}(D)$ от $t_{\text{НК}}$:

$$D = 0.0548 \cdot t_{\text{НК}}^2 + 2,5168 \cdot t_{\text{НК}} + 29,009 \quad . \quad (5.2)$$

Достоверность аппроксимации 0,859.

Пример 5.2. *Определить долю $R_{\text{ПНС}}$ в $R_{\text{ПК}}(D)$ проектируемого ограждения при $t_{\text{НК}}$, равной среднемесячной температуре января: $t_{\text{Н}} = -11,6^\circ\text{C}$.*

$$D = 0.0548 \cdot (-11,6)^2 + 2,5168 \cdot (-11,6) + 29,009 = 0,0548 \cdot 134,56 - 2,5168 \cdot 11,6 + 29,009 = 7,2\%.$$

Обоснование выбора характерных температур из таблицы 5.1 в качестве проектируемого ограждения требует самостоятельного исследования. Однако в первом приближении можно принять в качестве $t_{\text{НК}}$ среднемесячную температуру января, так как в осенне-зимний период среднемесячные температуры воздуха выше январской (то есть выше $t_{\text{НК}}$), и конденсация водяного пара не возникает. В этом случае конденсация будет возможна только за счет суточных амплитуд наружного воздуха и отдельных волн холода.

Таким образом, исследования, проведенные в настоящем разделе, позволили получить необходимые обоснования и данные для проектирования ограждающих конструкций с ограничением конденсации в них водяного пара.

Заключение

Настоящая монография представляет собой научно-методическое издание. Ее содержание позволяет оценить и регулировать конденсацию водяного пара на стадии проектирования ограждающих конструкций в заданном климате.

Все разделы монографии представляют собой последовательное изложение метода проектирования ограждающих конструкций.

Введено новое теплотехническое понятие «Температура начала конденсации ограждающих конструкций», величина которой является индикатором переувлажнения ограждающих конструкций. Разработан метод определения температуры начала конденсации и изучена зависимость этой температуры от параметров ограждающей конструкции.

Количество конденсата, образующегося в ограждении за зимний период, зависит как от конструкции ограждения и свойств материальных слоев, так и от температуры наружного воздуха места строительства.

Величина температуры начала конденсации, продолжительность конденсации и количество конденсата взаимосвязаны между собой. Однако если температура начала конденсации зависит только от конструктивных особенностей ограждения, то продолжительность конденсации и количество конденсата зависят от годового хода температуры наружного воздуха места строительства. При этом основным параметром, который определяет негативное воздействие влаги на эксплуатационные свойства ограждающих конструкций, является количество конденсата.

В отечественных исследованиях и нормативных документах не обнаружено требований к количеству конденсата. В Германии, например, такие требования существуют: допустимое количество конденсата не должно превышать 500 г/м^2 для стен зданий и 10 г/м^2 – для покрытий зданий [52].

Применение этих норм для отечественной проектной практики не может быть принято, поскольку существует большое различие в температурах наружного воздуха в зимние месяцы. Если средняя температура января в Берлине равна 0°C , то на Европейской территории России эта температура ниже: -10°C . Очевидно, что отечественные требования к количеству конденсата должны быть более жесткими.

Более того, можно предположить, что допустимое количество конденсата должно быть различным для различных видов негативного воздействия влаги на ограждения: снижение теплозащиты, коррозия материалов, в том числе биокоррозия, многократное увлажнение и высушивание материалов или их замораживание и оттаивание.

Определение температуры начала конденсации в трех типах ограждающих конструкций

1. Ограждающая конструкция с тонким слоем наружной штукатурки
2. Ограждающая конструкция с утеплителем из монолитного пенобетона (приведена в Стандарте организации РОИС СТО 000-44807-001-2006[23])
3. Ограждающая конструкция с утеплителем из экструдированного пенополистирола (приведена в СП 23-101-2004[8]).

Для выявления влияния конструктивных решений ограждений на температуру начала конденсации водяного пара параметры микроклимата помещений и климата места строительства приняты едиными для всех типов ограждений.

Параметры микроклимата помещений:

$$t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi_B = 50 \%, E_B = 2338 \text{ Па}, e_B = 0,5 \cdot 2338 = 1169 \text{ Па}.$$

Параметры климата места строительства (Казань):

- 1) Среднегодовая температура наружного воздуха: $t_{н,1} = +4,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{н,1} = 76 \%$, $E_{н,1} = 825 \text{ Па}$, $e_{н,1} = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па}$
- 2) Средняя температура наиболее холодного месяца: $t_{н,2} = -11,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{н,2} = 80 \%$, $E_{н,2} = 225 \text{ Па}$, $e_{н,2} = 0,8 \cdot 225 = 180 \text{ Па}$
- 3) Средняя температура наиболее холодного месяца, уменьшенная на максимальную суточную амплитуду $t_{н,3} = -11,6 + (-10,2) = -21,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{н,3} = 84 \%$, $E_{н,3} = 87 \text{ Па}$, $e_{н,3} = 0,84 \cdot 87 = 73 \text{ Па}$.

1. Ограждающая конструкция с тонким слоем наружной штукатурки

Параметры слоев ограждения:

- 1) Внутренняя цементно-известковая штукатурка, $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, $\delta_1 = 15 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$, $\mu_1 = 0,12 \text{ мг/(м} \cdot \text{ ч} \cdot \text{ Па)}$
- 2) Кладка из силикатного кирпича $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\delta_2 = 250 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 0,87 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$, $\mu_2 = 0,11 \text{ мг/(м} \cdot \text{ ч} \cdot \text{ Па)}$
- 3) Минераловатные плиты Rockwool $\rho_0 = 140 \text{ кг/м}^3$, $\delta_3 = 100 \text{ мм}$, $\lambda_3 = 0,041 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$, $\mu_3 = 0,3 \text{ мг/(м} \cdot \text{ ч} \cdot \text{ Па)}$
- 4) Наружная штукатурка из материала Ceresit СТ-190 $\delta_4 = 5 \text{ мм}$, $R_{\text{шт}} = 0,045 \text{ (м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)/Вт}$, $R_{\text{шт}} = 0,225 \text{ (м}^2 \cdot \text{ ч} \cdot \text{ Па)/мг}$.

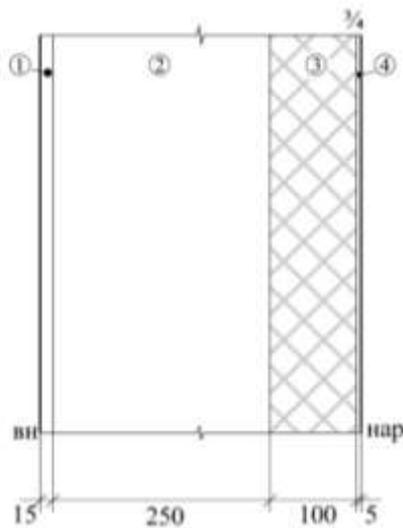


Рис. П1.1. Расчетная схема ограждающей конструкции

Расчетная схема ограждения приведена на рисунке П1.1. В качестве расчетного сечения принята наружная поверхность утеплителя, сечение 3/4.

Расчет теплотехнических параметров:

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + R_{\text{ПШ}} + \frac{1}{\alpha_{\text{Н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,7} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + 0,045 + 0,04 = 3,24 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/4}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,7} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} = 2,86 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,Н.П.}} = R_{\text{ТО}} - \frac{1}{\alpha_{\text{Н}}} = 3,24 - 0,04 = 2,9 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + R_{\text{ПШ}} = \frac{0,015}{0,12} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} + 0,225 = 2,95 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг} .$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{ПВ}}$ и $R_{\text{ПН}}$ при $t_{\text{Н,1}} = +4,2 \text{ °C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н,1}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,94} \cdot \frac{1}{8,7} = 19,4 \text{ °C} , E_{\text{ВП}} = 2252 \text{ Па} ,$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2252 = 1126 \text{ Па} ,$$

$$\tau_{\text{Н}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н,1}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,Н.П.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,94} \cdot 2,9 = 4,4 \text{ °C} , E_{\text{НП}} = 836 \text{ Па} ,$$

$$e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па} .$$

Поток водяного пара через ограждение:

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1126 - 635}{2,95} = 166,4 \text{ мг / (м}^2 \cdot \text{ч)} ,$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1126}{166,4} = 0,26 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{166,4} = 0,05 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,26 + 2,95 + 0,05 = 3,26 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{П,3/4}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 0,26 + \frac{0,015}{0,12} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} = 2,99 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Расчет температуры $\tau_{3/4}$, давления насыщения $E_{3/4}$, парциального давления водяного пара $e_{3/4}$ и разности $(E_{3/4} - e_{3/4})$ в расчетном сечении 3/4:

- При температуре $t_{\text{н,1}} = +4,2 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/4}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,94} \cdot 2,86 = 4,6 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_{3/4} = 848 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{3,26} \cdot 2,99 = 672 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 848 - 672 = 176 \text{ Па}$.

- При температуре $t_{\text{н,2}} = -11,6 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/4}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{2,94} \cdot 2,86 = -10,7 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_{3/4} = 242 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{3,26} \cdot 2,99 = 262 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 242 - 262 = -20 \text{ Па}$.

- При температуре $t_{\text{н,3}} = -21,8 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/4}} = 20 - \frac{20 + 21,8}{2,94} \cdot 2,86 = -20,7 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_{3/4} = 96 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 73}{3,26} \cdot 2,99 = 164 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 96 - 164 = -68 \text{ Па}$.

Зависимость разности $(E - e)$ от температуры наружного воздуха для данного ограждения приведена на рисунке П1.4. Пересечение зависимости $(E - e)$ от $t_{\text{н}}$ для расчетного сечения 3/4 с горизонталью $(E - e) = 0$ позволяет определить температуру начала конденсации в данном ограждении: $t_{\text{НК,1}} = -10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2. Ограждающая конструкция с утеплителем из монолитного пенобетона

Параметры слоев ограждения:

1) Внутренняя штукатурка из известково-песчаного раствора, $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, $\delta_1 = 20 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\mu_1 = 0,12 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$

2) Керамический эффективный кирпич $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, $\delta_2 = 0,25 \text{ м}$, $\lambda_2 = 0,58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\mu_2 = 0,14 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$

3) Монолитный пенобетон $\rho_0 = 300 \text{ кг/м}^3$, $\delta_3 = 0,15 \text{ м}$, $\lambda_3 = 0,095 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\mu_3 = 0,25 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$

4) Керамический эффективный кирпич $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, $\delta_4 = 0,25 \text{ м}$, $\lambda_4 = 0,58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\mu_4 = 0,14 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

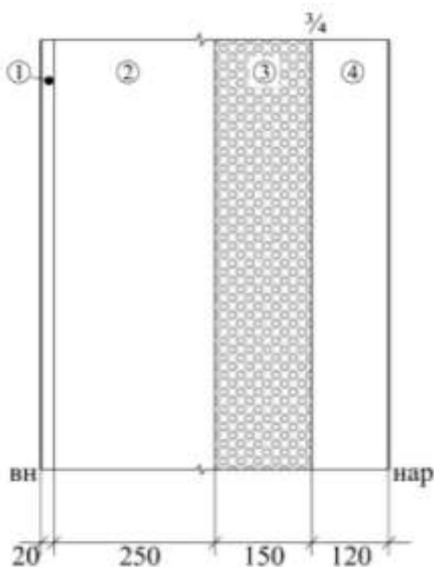


Рис III.2. Расчетная схема ограждающей конструкции

Расчетная схема ограждения приведена на рисунке III.2. В качестве расчетного сечения принята наружная поверхность утеплителя, сечение 3/4.

Расчет теплотехнических параметров:

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,58} + \frac{0,15}{0,095} + \frac{0,12}{0,58} + \frac{1}{23} = 2,4 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} \quad ,$$

$$R_{\text{Т,3/4}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,58} + \frac{0,15}{0,095} = 2,15 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} \quad ,$$

$$R_{\text{Т,н.п.}} = R_{\text{ТО}} - \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = 2,4 - 0,04 = 2,36 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} \quad ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_4}{\mu_4} = \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,25}{0,14} + \frac{0,15}{0,25} + \frac{0,12}{0,14} = 3,41 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ}$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{ПВ}}$ и $R_{\text{ПН}}$ при $t_{\text{Н},1} = +4,2^\circ\text{C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н},1}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,4} \cdot 0,11 = 19,3^\circ\text{C}, E_{\text{ВП}} = 2238 \text{ Па},$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2238 = 1119 \text{ Па}.$$

$$\tau_{\text{Н}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н},1}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,Н.П.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,4} \cdot 2,16 = 4,5^\circ\text{C}, E_{\text{НП}} = 842 \text{ Па},$$

$$e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 842 = 640 \text{ Па}.$$

Поток водяного пара через ограждение:

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1119 - 640}{3,41} = 140,5 \text{ МГ} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right),$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1119}{140,5} = 0,36 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{640 - 627}{140,5} = 0,09 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ},$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,36 + 3,41 + 0,09 = 3,86 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ},$$

$$R_{\text{П,3/4}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 0,36 + \frac{0,02}{0,12} + \frac{0,25}{0,14} + \frac{0,15}{0,25} = 2,91 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ}.$$

Расчет температуры $\tau_{3/4}$, давления насыщения $E_{3/4}$, парциального давления водяного пара $e_{3/4}$ и разности $(E_{3/4} - e_{3/4})$ в расчетном сечении 3/4:

• При температуре $t_{\text{Н},1} = +4,2^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/4}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,4} \cdot 2,15 = 5,8^\circ\text{C}, E_{3/4} = 922 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{3,86} \cdot 2,91 = 760 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 922 - 760 = 162 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{Н},2} = -11,6^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/4}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{2,4} \cdot 2,15 = -8,3^\circ\text{C}, E_{3/4} = 301 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{3,86} \cdot 2,91 = 423 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 301 - 423 = -122 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{Н},3} = -21,8^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т}, 3/4} = 20 - \frac{20 + 21,8}{2,4} \cdot 2,15 = -17,4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_{3/4} = 132 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П}, 3/4} = 1169 - \frac{1169 - 73}{3,86} \cdot 2,91 = 343 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 132 - 343 = -211 \text{ Па}$.

Зависимость разности $(E - e)$ от температуры наружного воздуха для данного ограждения приведена на рисунке П1.4. Пересечение зависимости $(E - e)$ от t_H для расчетного сечения 3/4 с горизонталью $(E - e) = 0$ позволяет определить температуру начала конденсации в данном ограждении, $t_{\text{НК},2} = -4 \text{ } ^\circ\text{C}$.

3. Ограждающая конструкция с утеплителем из экструдированного пенополистирола

Параметры слоев ограждения:

1) Гипсовая штукатурка: $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\delta_1 = 5 \text{ мм}$,
 $\lambda_1 = 0,35 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\mu_1 = 0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$

2) Железобетон: $\rho_0 = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\delta_2 = 0,1 \text{ м}$, $\lambda_2 = 2,04 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$,
 $\mu_2 = 0,03 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$

3) Экструдированный пенополистирол Styrofoam 1BA:
 $\rho_0 = 28 \text{ кг/м}^3$, $\delta_3 = 0,1 \text{ м}$, $\lambda_3 = 0,031 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\mu_3 = 0,006 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$

4) Керамический кирпич: $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\delta_4 = 0,12 \text{ м}$,
 $\lambda_4 = 0,81 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\mu_4 = 0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$

5) Штукатурка из поризованного гипсоперлитового раствора:
 $\rho_0 = 500 \text{ кг/м}^3$, $\delta_4 = 8 \text{ мм}$, $\lambda_4 = 0,19 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\mu_4 = 0,43 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

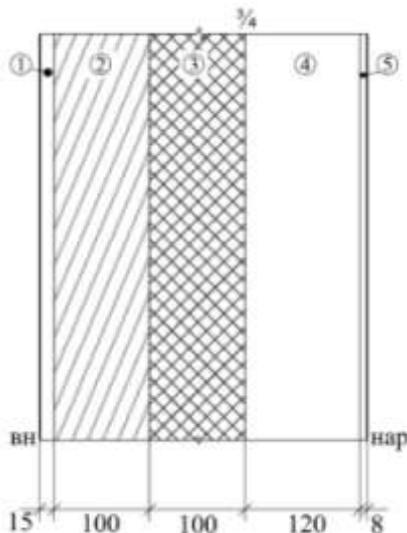


Рис П1.3. Расчетная схема ограждающей конструкции

Расчетная схема ограждения приведена на рисунке П1.3. В качестве расчетного сечения принята наружная поверхность утеплителя, сечение 3/4.

Расчет теплотехнических параметров:

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_{\text{Н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,005}{0,35} + \frac{0,1}{2,04} + \frac{0,1}{0,031} + \frac{0,12}{0,81} + \frac{0,008}{0,19} + \frac{1}{23} = 3,62 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/4}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,005}{0,35} + \frac{0,1}{2,04} + \frac{0,1}{0,031} = 3,39 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,н.п.}} = R_{\text{ТО}} - \frac{1}{\alpha_{\text{Н}}} = 3,62 - \frac{1}{23} = 3,58 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_4}{\mu_4} + \frac{\delta_5}{\mu_5} = \frac{0,005}{0,11} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{0,1}{0,006} + \frac{0,12}{0,11} + \frac{0,008}{0,43} = 21,15 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{ПВ}}$ и $R_{\text{ПН}}$ при $t_{\text{н,1}} = +4,2 \text{°C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{н,1}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,62} \cdot 0,11 = 19,5 \text{°C}, E_{\text{ВП}} = 2266 \text{Па} ,$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2238 = 1133 \text{Па} ,$$

$$\tau_{\text{Н}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{н,1}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,н.п.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,62} \cdot 3,58 = 4,4 \text{°C}, E_{\text{НП}} = 836 \text{Па} ,$$

$$e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{Па} .$$

Поток водяного пара через ограждение:

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1133 - 635}{21,15} = 23,5 \text{МГ} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right) ,$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1133}{23,5} = 1,53 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{23,5} = 0,34 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 1,53 + 21,15 + 0,34 = 23,02 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{П,3/4}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 1,53 + \frac{0,005}{0,11} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{0,1}{0,006} = 21,57 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Расчет температуры $\tau_{3/4}$, давления насыщения $E_{3/4}$, парциального давления водяного пара $e_{3/4}$ и разности $(E_{3/4} - e_{3/4})$ в расчетном сечении 3/4:

• При температуре $t_{\text{н,1}} = +4,2 \text{°C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/4}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,62} \cdot 3,39 = 5,2 \text{°C}, E_{3/4} = 885 \text{Па},$$

$$e_{3/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},3/4} = 1169 - \frac{1169 - 627}{23,02} \cdot 21,57 = 661 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 885 - 661 = 224 \text{ Па} .$

• При температуре $t_{\text{н},2} = -11,6^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т},3/4} = 20 - \frac{20 + 11,6}{3,62} \cdot 3,39 = -9,6^\circ\text{C}, \quad E_{3/4} = 268 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},3/4} = 1169 - \frac{1169 - 180}{23,0} \cdot 21,57 = 242 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 268 - 242 = 26 \text{ Па} .$

• При температуре $t_{\text{н},3} = -21,8^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т},3/4} = 20 - \frac{20 + 21,8}{3,62} \cdot 3,39 = -19,1^\circ\text{C}, \quad E_{3/4} = 112 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П},3/4} = 1169 - \frac{1169 - 73}{23,02} \cdot 21,57 = 142 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 112 - 142 = -30 \text{ Па} .$

Зависимость разности $(E - e)$ от температуры наружного воздуха для данного ограждения приведена на рисунке П1.4.

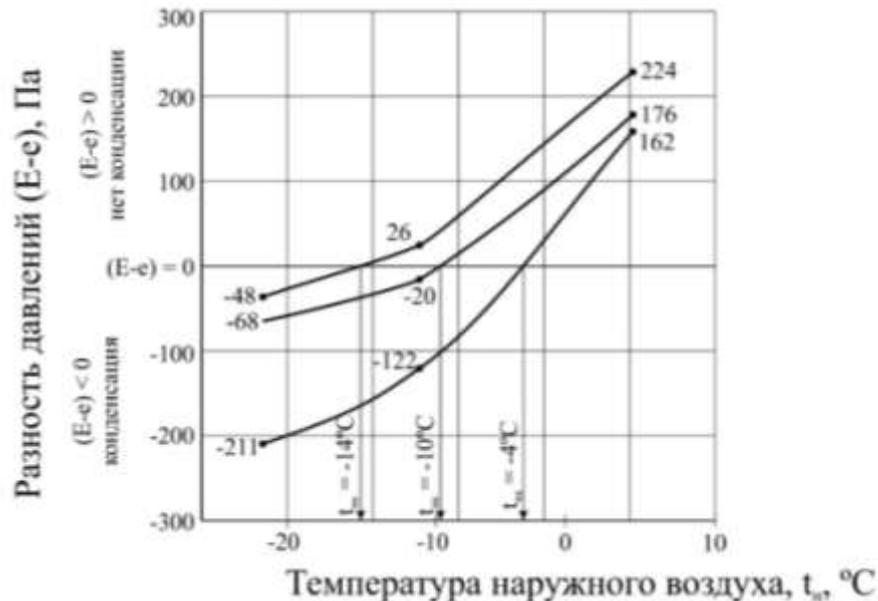


Рис. П1.4. Определение температуры начала конденсации:

1. Ограждение с тонким слоем наружной штукатурки, $t_{\text{нк}} = -10^\circ\text{C}$
2. Ограждение с утеплителем из монолитного пенобетона, $t_{\text{нк}} = -4^\circ\text{C}$
3. Ограждение с утеплителем из экструдированного пенополистирола, $t_{\text{нк}} = -15^\circ\text{C}$

Пересечение зависимости $(E - e)$ от $t_{\text{н}}$ для расчетного сечения 3/4 с горизонталью $(E - e) = 0$ позволяет определить температуру начала конденсации в данном ограждении, $t_{\text{нк},3} = -15^\circ\text{C}$.

Определение влияния наружных слоев ограждений на температуру начала конденсации водяного пара

Исходные данные

Схема основной конструкции ограждения и наружных слоев приведена на рисунке П2.1.

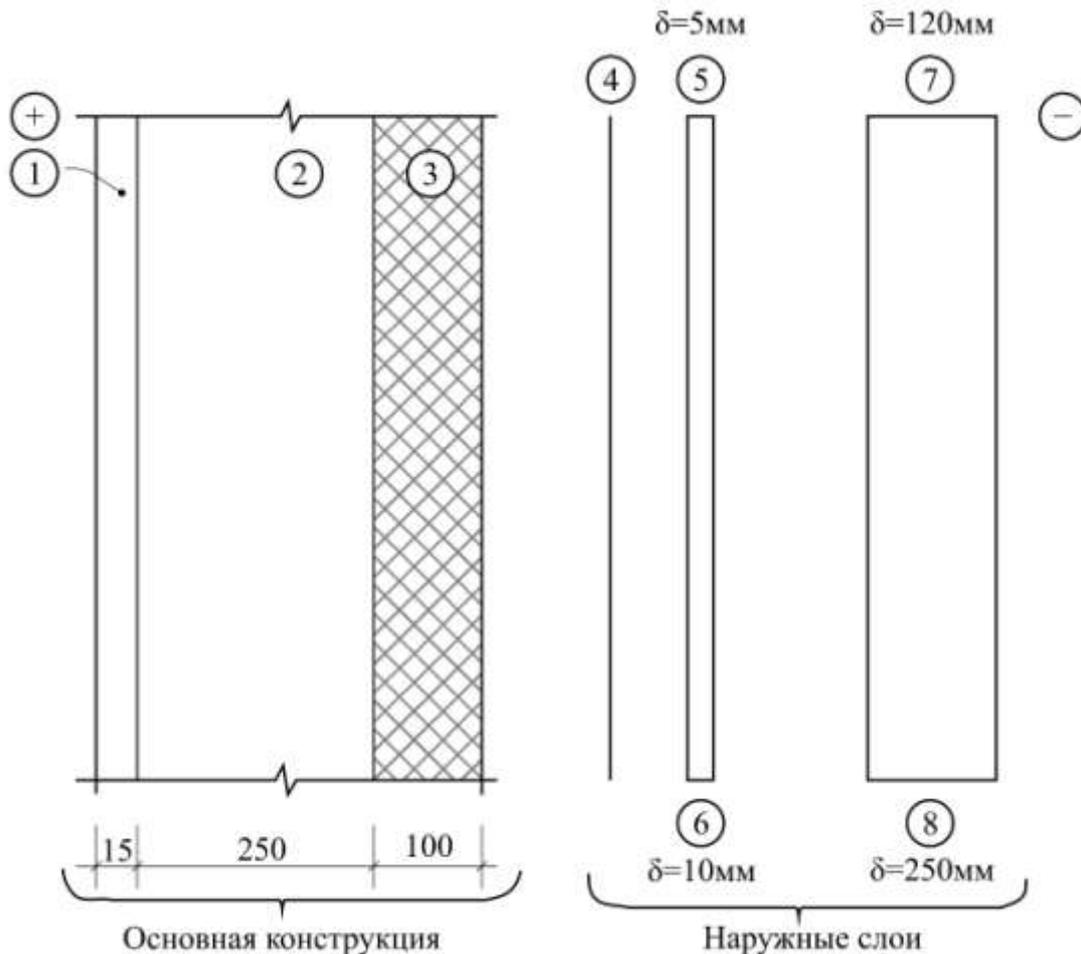


Рис. П2.1. Схема основных конструкций ограждения и наружных слоев

Параметры слоев

1. Цементно-песчаный раствор $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_1 = 0,93 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; $\mu_1 = 0,09 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$ $\delta_1 = 15 \text{ мм}$; $G_1 = 0,09/0,015 = 6 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$
2. Силикатный кирпич $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_2 = 0,87 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$; $\mu_2 = 0,11 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_2 = 250 \text{ мм}$; $G_2 = 0,11/0,25 = 0,44 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$

3. Минеральная вата, $\rho_0 = 90 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_3 = 0,041 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
 $\mu_3 = 0,3 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_3 = 100 \text{ мм}$; $G_3 = 0,3/0,1 = 3 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$
4. Влаговетрозащитная мембрана «Изоспан А»; $\delta_4 = 0,45 \text{ мм}$;
 $R_{\text{п}} = 0,016 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг}$; $G_4 = 1/R_{\text{п}} = 1/0,016 = 62 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
5. Штукатурка из сухой смеси Ceresit СТ-190, $\lambda_5 = 0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
 $\mu_5 = 0,02 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_5 = 5 \text{ мм}$; $G_5 = 0,02/0,005 = 4 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$
6. То же, толщиной 10 мм, $G_6 = 0,02/0,01 = 2 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$,
7. Керамический кирпич, $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_7 = 0,58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
 $\mu_7 = 0,11 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$; $\delta_7 = 120 \text{ мм}$; $G_7 = 0,11/0,12 = 0,83 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$
8. То же, толщиной 250 мм, $G_8 = 0,11/0,25 = 0,44 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

Варианты ограждающих конструкций

Объединением основной конструкции с каждым наружным слоем получено шесть вариантов ограждающих конструкций с определенными соотношениями паропроницаемости слоев.

Вариант 1, основная конструкция без наружного слоя, $6 > 0,44 < 3 < \infty$

Вариант 2, основная конструкция и «Изоспан А», $6 > 0,44 < 3 < 62$

Вариант 3, основная конструкция и 5 мм штукатурки, $6 > 0,44 < 3 < 4$

Вариант 4, основная конструкция и 10 мм штукатурки, $6 > 0,44 < 3 > 2$

Вариант 5, основная конструкция и 120 мм кладки, $6 > 0,44 < 3 > 1,167$

Вариант 6, основная конструкция и 250 мм кладки, $6 > 0,44 < 3 > 0,56$

Параметры микроклимата помещений:

$t_{\text{в}} = 20 \text{ °C}$, $\varphi_{\text{в}} = 50 \%$, $E_{\text{в}} = 2338 \text{ Па}$, $e_{\text{в}} = 0,5 \cdot 2338 = 1169 \text{ Па}$.

Параметры климата места строительства (Казань):

- 1) Среднегодовая температура наружного воздуха: $t_{\text{н},1} = +4,2 \text{ °C}$,
 $\varphi_{\text{н},1} = 76 \%$, $E_{\text{н},1} = 825 \text{ Па}$, $e_{\text{н},1} = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па}$
- 2) Средняя температура наиболее холодного месяца: $t_{\text{н},2} = -11,6 \text{ °C}$,
 $\varphi_{\text{н},2} = 80 \%$, $E_{\text{н},2} = 225 \text{ Па}$, $e_{\text{н},2} = 0,8 \cdot 225 = 180 \text{ Па}$
- 3) Средняя температура наиболее холодного месяца, уменьшенная на максимальную суточную амплитуду $t_{\text{н},3} = -11,6 + (-10,2) = -21,8 \text{ °C}$,
 $\varphi_{\text{н},3} = 84 \%$, $E_{\text{н},3} = 87 \text{ Па}$, $e_{\text{н},3} = 0,84 \cdot 87 = 73 \text{ Па}$.

Решение:

Вариант 1. Основная конструкция без наружного слоя

Расчет теплотехнических параметров:

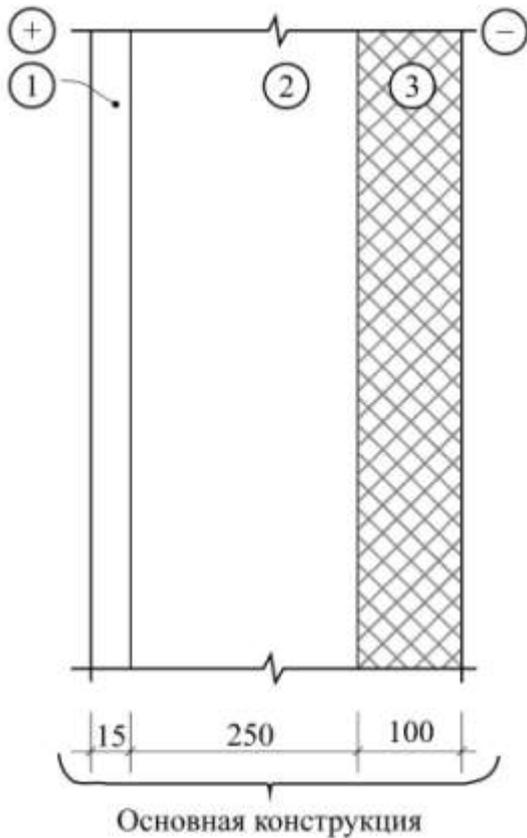


Рис. П2.2. Схема конструкции ограждения

$$R_{ТО} = R_{ТВ} + R_{ТК} + R_{ТН} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_H} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{1}{23} = 2,89 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{Т,н.п.} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} = 2,85 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{ПК} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} = 2,77 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{ПВ}$ и $R_{ПН}$ при $t_H = +4,2^\circ\text{C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_B = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{ТО}} \cdot R_{ТВ} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,89} \cdot 0,11 = 19,4^\circ\text{C}, E_{ВП} = 2251 \text{ Па} ,$$

$$e_{ВП} = 0,5 \cdot 2251 = 1126 \text{ Па} ,$$

$$\tau_H = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{ТО}} \cdot R_{Т,н.п.} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,89} \cdot 2,85 = 4,4^\circ\text{C}, E_{НП} = 836 \text{ Па} ,$$

$$e_{НП} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па} ,$$

$$G_K = \frac{e_{ВП} - e_{НП}}{R_{ПК}} = \frac{1126 - 635}{2,77} = 177 \text{ МГ} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right) ,$$

$$R_{ПВ} = \frac{e_B - e_{ВП}}{G_K} = \frac{1169 - 1126}{177} = 0,24 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{ПН} = \frac{e_{НП} - e_H}{G_K} = \frac{635 - 627}{177} = 0,04 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,24 + 2,77 + 0,04 = 3,05 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{П,Н.П.}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} = 0,24 + 2,77 = 3,01 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Определение разности $(E_{\text{НП}} - e_{\text{НП}})$ по расчетному сечению (на наружной поверхности основной конструкции):

• При температуре $t_{\text{Н,1}} = +4,2^\circ\text{C}$:

$$\tau_{\text{НП}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,Н.П.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,89} \cdot 2,85 = 4,4^\circ\text{C}, \quad E_{\text{НП}} = 836 \text{ Па} ,$$

$$e_{\text{НП}} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,Н.П.}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{3,05} \cdot 3,01 = 634 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{\text{НП}} - e_{\text{НП}}) = 836 - 634 = 202 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{Н,2}} = -11,6^\circ\text{C}$:

$$\tau_{\text{НП}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,Н.П.}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{2,89} \cdot 2,85 = -11,2^\circ\text{C}, \quad E_{\text{НП}} = 233 \text{ Па},$$

$$e_{\text{НП}} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,Н.П.}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{3,05} \cdot 3,01 = 193 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{\text{НП}} - e_{\text{НП}}) = 233 - 193 = 40 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{Н,3}} = -21,8^\circ\text{C}$:

$$\tau_{\text{НП}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,Н.П.}} = 20 - \frac{20 + 21,8}{2,89} \cdot 2,85 = -21,2^\circ\text{C}, \quad E_{\text{НП}} = 91 \text{ Па},$$

$$e_{\text{НП}} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,Н.П.}} = 1169 - \frac{1169 - 73}{3,05} \cdot 3,01 = 87 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{\text{НП}} - e_{\text{НП}}) = 91 - 87 = 4 \text{ Па}$.

При всех расчетных температурах наружного воздуха разность давлений $(E - e) > 0$, следовательно, при этих $t_{\text{Н}}$ конденсация водяного пара отсутствует. Выполним расчет при дополнительной температуре наиболее холодной пятидневки: $t_{\text{Н}} = -31^\circ\text{C}$.

• При температуре наружного воздуха $t_{\text{Н}} = -31^\circ\text{C}$:

$$\varphi_{\text{Н}} = 84\% , \quad E_{\text{Н}} = 34 \text{ Па} , \quad e_{\text{Н}} = 0,84 \cdot 34 = 28 \text{ Па} ,$$

$$\tau_{\text{НП}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,Н.П.}} = 20 - \frac{20 + 31}{2,89} \cdot 2,85 = -30^\circ\text{C}, \quad E_{\text{НП}} = 38 \text{ Па},$$

$$e_{\text{НП}} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,Н.П.}} = 1169 - \frac{1169 - 28}{3,05} \cdot 3,01 = 43 \text{ Па} ,$$

Разность давлений $(E_{\text{НП}} - e_{\text{НП}}) = 38 - 43 = -5 \text{ Па}$.

Результаты расчета зависимости $(E_{\text{НП}} - e_{\text{НП}})$ от $t_{\text{Н}}$ для данного ограждения приведены на рисунке П2.8. Из рисунка следует, что температура начала

конденсации водяного пара в ограждении по варианту 1 составляет:
 $t_{\text{НК}} = -25 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Вариант 2. Основная конструкция и «Изоспан А»

Расчет теплотехнических параметров:

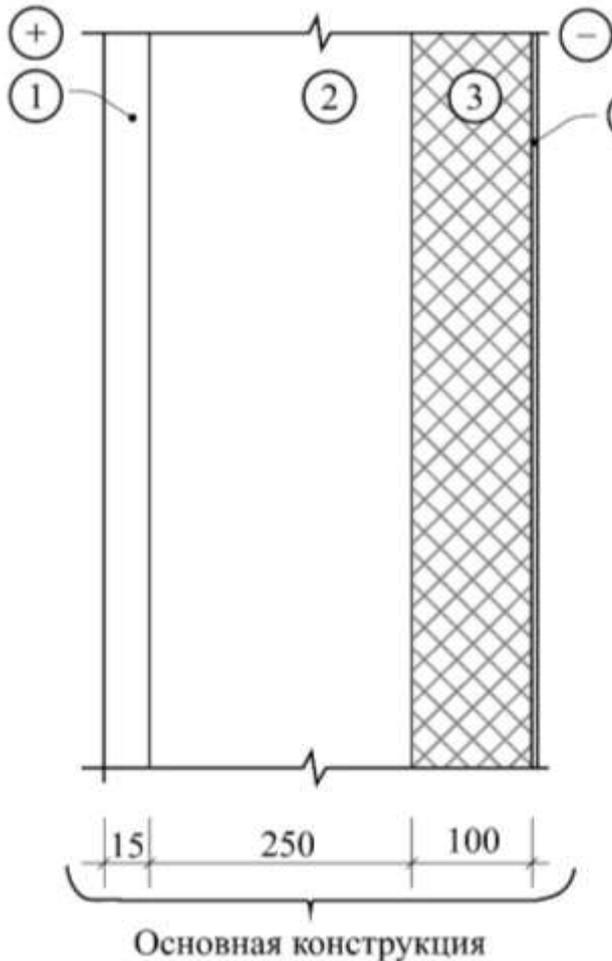


Рис П2.3. Схема основной конструкции ограждения

$$R_{\text{ТО}} = R_{\text{ТВ}} + R_{\text{ТК}} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + R_{\text{ТН}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_{\text{Н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,00045}{0,18} + \frac{1}{23} = 2,91 \text{ (м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C) / Вт ,}$$

$$R_{\text{Т,3/4}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} = 2,85 \text{ (м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C) / Вт ,}$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + R_{\text{ПН}} = \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} + 0,016 = 2,79 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / Мг ,}$$

$$R_{\text{Т,Н.П.}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,00045}{0,18} = 2,85 \text{ (м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C) / Вт .}$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{ПВ}}$ и $R_{\text{ПН}}$ при $t_{\text{Н}} = +4,2 \text{ } ^\circ\text{C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,91} \cdot 0,11 = 19,4 \text{ } ^\circ\text{C}, E_{\text{ВП}} = 2251 \text{ Па ,}$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2251 = 1126 \text{ Па ,}$$

$$\tau_{\text{H}} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T, H. П.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,91} \cdot 2,85 = 4,5 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{\text{HП}} = 842 \text{ Па},$$

$$e_{\text{HП}} = 0,76 \cdot 842 = 640 \text{ Па}.$$

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{HП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1126 - 640}{2,79} = 174 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1126}{174} = 0,25 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{HП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{640 - 627}{174} = 0,07 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,25 + 2,79 + 0,07 = 3,1 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{П, 3/4}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 0,25 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} = 3,02 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}.$$

Определение разности ($E_{3/4} - e_{3/4}$) по расчетному сечению 3/4:

• При температуре $t_{\text{H,1}} = +4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T, 3/4}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,91} \cdot 2,85 = 4,5 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{3/4} = 842 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П, 3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{3,1} \cdot 3,02 = 641 \text{ Па}.$$

Разность давлений ($E_{3/4} - e_{3/4}$) = 842 - 641 = 201 Па.

• При температуре $t_{\text{H,2}} = -11,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T, 3/4}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{2,91} \cdot 2,85 = -10,9 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{3/4} = 240 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П, 3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{3,1} \cdot 3,02 = 205 \text{ Па}.$$

Разность давлений ($E_{3/4} - e_{3/4}$) = 240 - 205 = 35 Па.

• При температуре $t_{\text{H,3}} = -21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T, 3/4}} = 20 - \frac{20 + 21,8}{2,91} \cdot 2,85 = -20,9 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{3/4} = 95 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П, 3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 73}{3,1} \cdot 3,02 = 101 \text{ Па}.$$

Разность давлений ($E_{3/4} - e_{3/4}$) = 95 - 101 = -6 Па.

• При температуре $t_{\text{H}} = -31 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/4} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T, 3/4}} = 20 - \frac{20 + 31}{2,91} \cdot 2,85 = -30 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{3/4} = 37 \text{ Па},$$

$$e_{3/4} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/4}} = 1169 - \frac{1169 - 28}{3,1} \cdot 3,02 = 57 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 37 - 57 = -20 \text{ Па} .$

Результаты расчета зависимости $(E_{3/4} - e_{3/4})$ от t_H для данного ограждения приведены на рисунке П2.8. Из рисунка следует, что температура начала конденсации водяного пара в ограждении по варианту 2 составляет: $t_{\text{НК}} = -20 \text{ }^\circ\text{C} .$

Вариант 3. Основная конструкция и 5 мм штукатурки

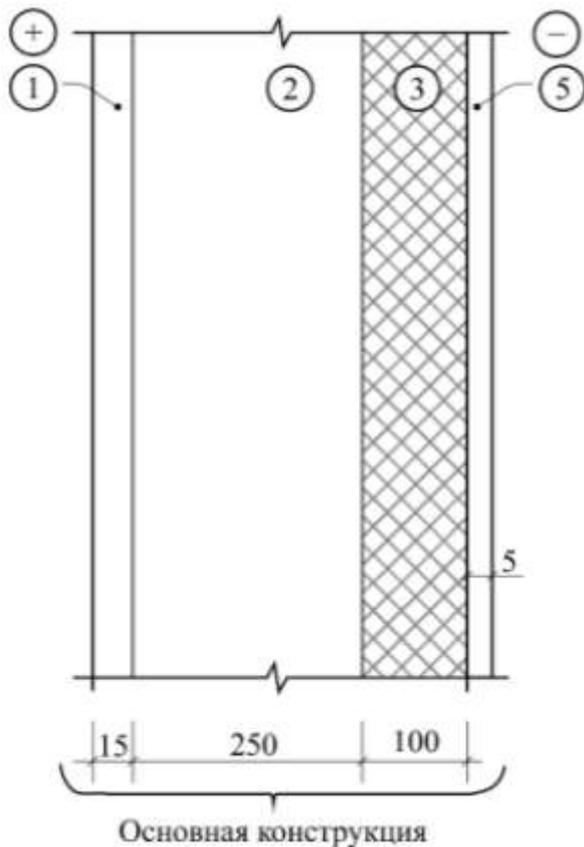


Рис. П2.4. Схема основной конструкции ограждения

Расчет теплотехнических параметров:

$$R_{\text{ТО}} = R_{\text{ТВ}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} +$$

$$+ R_{\text{ТН}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} +$$

$$+ \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,005}{0,12} + \frac{1}{23} =$$

$$= 2,93 \left(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/5}} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} =$$

$$= \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} =$$

$$= 2,85 \left(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_5}{\mu_5} =$$

$$= \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,005}{0,02} =$$

$$= 3,02 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг} ,$$

$$R_{\text{Т,н.п.}} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} =$$

$$\frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,005}{0,12} =$$

$$= 2,89 \left(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \right) / \text{Вт} .$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{ПВ}}$ и $R_{\text{ПН}}$ при $t_{\text{H}} = +4,2^{\circ}\text{C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,93} \cdot 0,11 = 19,4^{\circ}\text{C}, E_{\text{ВП}} = 2251 \text{ Па},$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2251 = 1126 \text{ Па},$$

$$\tau_{\text{Н}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,Н.П.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,93} \cdot 2,89 = 4,4^{\circ}\text{C}, E_{\text{НП}} = 836 \text{ Па},$$

$$e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па},$$

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1126 - 635}{3,02} = 162 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1126}{162} = 0,26 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{162} = 0,05 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,26 + 3,02 + 0,05 = 3,33 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{П,3/5}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 0,26 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} = 3,03 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}.$$

Определение разности $(E_{3/5} - e_{3/5})$ по расчетному сечению 3/5:

• При температуре $t_{\text{H,1}} = +4,2^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/5} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/5}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,93} \cdot 2,85 = 4,6^{\circ}\text{C}, E_{3/5} = 848 \text{ Па},$$

$$e_{3/5} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/5}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{3,33} \cdot 3,03 = 676 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{3/5} - e_{3/5}) = 848 - 676 = 172 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{H,2}} = -11,6^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/5} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/5}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{2,93} \cdot 2,85 = -10,7^{\circ}\text{C}, E_{3/5} = 243 \text{ Па},$$

$$e_{3/5} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/5}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{3,33} \cdot 3,03 = 269 \text{ Па}.$$

Разность давлений: $(E_{3/5} - e_{3/5}) = 243 - 269 = -26 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{H,3}} = -21,8^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/5} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/5}} = 20 - \frac{20 + 21,8}{2,93} \cdot 2,85 = -20,2^{\circ}\text{C}, E_{3/5} = 101 \text{ Па},$$

$$e_{3/5} = e_B - \frac{e_B - e_H}{R_{\text{по}}} \cdot R_{\text{п,3/5}} = 1169 - \frac{1169 - 73}{3,33} \cdot 3,03 = 172 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/5} - e_{3/5}) = 101 - 172 = -71 \text{ Па} .$

Результаты расчета зависимости $(E_{3/5} - e_{3/5})$ от t_H для данного ограждения приведены на рисунке П2.8. Из рисунка следует, что температура начала конденсации водяного пара в ограждении по варианту 3 составляет: $t_{\text{нк}} = -9 \text{ } ^\circ\text{C} .$

Вариант 4. Основная конструкция и 10 мм штукатурки

Расчет теплотехнических параметров

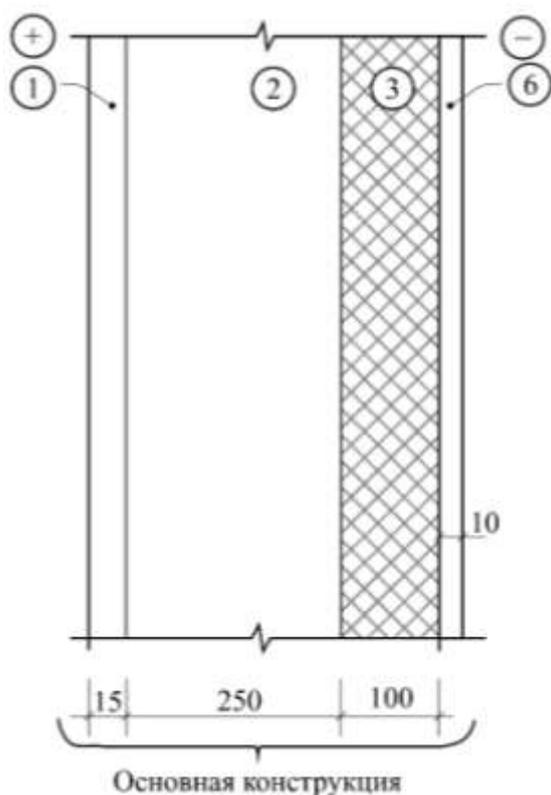


Рис. П2.5. Схема основной конструкции ограждения

$$R_{\text{то}} = R_{\text{тв}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_6}{\lambda_6} + R_{\text{тн}} =$$

$$= \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,01}{0,12} +$$

$$+ \frac{1}{23} = 2,97 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт} ,$$

$$R_{\text{т,3/6}} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} +$$

$$+ \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} =$$

$$= 2,85 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$$

$$R_{\text{пк}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_6}{\mu_6} = \frac{0,015}{0,09} +$$

$$+ \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,01}{0,02} = 3,27 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг} ,$$

$$R_{\text{т,н.п.}} = R_{\text{то}} - R_{\text{тн}} = 2,97 - \frac{1}{23} =$$

$$= 2,93 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт} .$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{пв}}$ и $R_{\text{пн}}$ при $t_H = +4,2 \text{ } ^\circ\text{C} ,$ то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_B = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_{\text{то}}} \cdot R_{\text{тв}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,97} \cdot 0,11 = 19,4 \text{ } ^\circ\text{C} , E_{\text{вп}} = 2251 \text{ Па} ,$$

$$e_{\text{вп}} = 0,5 \cdot 2251 = 1126 \text{ Па} ,$$

$$\tau_{\text{H}} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T, H.П.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,97} \cdot 2,93 = 4,4 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{\text{HП}} = 836 \text{ Па},$$

$$e_{\text{HП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па},$$

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{HП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1126 - 635}{3,27} = 150 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1126}{150} = 0,29 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{HП}} - e_{\text{H}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{150} = 0,05 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,29 + 3,27 + 0,05 = 3,61 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{П,3/6}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 0,29 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} = 3,06 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}.$$

Определение разности $(E_{3/6} - e_{3/6})$ по расчетному сечению 3/6:

• При температуре $t_{\text{H,1}} = +4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/6} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T,3/6}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,97} \cdot 2,85 = 4,8 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{3/6} = 860 \text{ Па},$$

$$e_{3/6} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{H}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/6}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{3,61} \cdot 3,06 = 709 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{3/6} - e_{3/6}) = 860 - 709 = 151 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{H,2}} = -11,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/6} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T,3/6}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{2,97} \cdot 2,85 = -10,3 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{3/6} = 253 \text{ Па},$$

$$e_{3/6} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{H}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/6}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{3,61} \cdot 3,06 = 331 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{3/6} - e_{3/6}) = 253 - 331 = -78 \text{ Па}$.

• При температуре $t_{\text{H,3}} = -21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_{3/6} = t_{\text{B}} - \frac{t_{\text{B}} - t_{\text{H}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{T,3/6}} = 20 - \frac{20 + 21,8}{2,97} \cdot 2,85 = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}, E_{3/6} = 103 \text{ Па},$$

$$e_{3/6} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{H}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/6}} = 1169 - \frac{1169 - 73}{3,61} \cdot 3,06 = 240 \text{ Па}.$$

Разность давлений $(E_{3/6} - e_{3/6}) = 103 - 240 = -137 \text{ Па}$.

Результаты расчета зависимости $(E_{3/6} - e_{3/6})$ от t_{H} для данного ограждения приведена на рисунке П2.8. Из рисунка следует, что температура начала конденсации водяного пара в ограждении по варианту 4 составляет: $t_{\text{НК}} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вариант 5. Основная конструкция и 120 мм кирпичной кладки

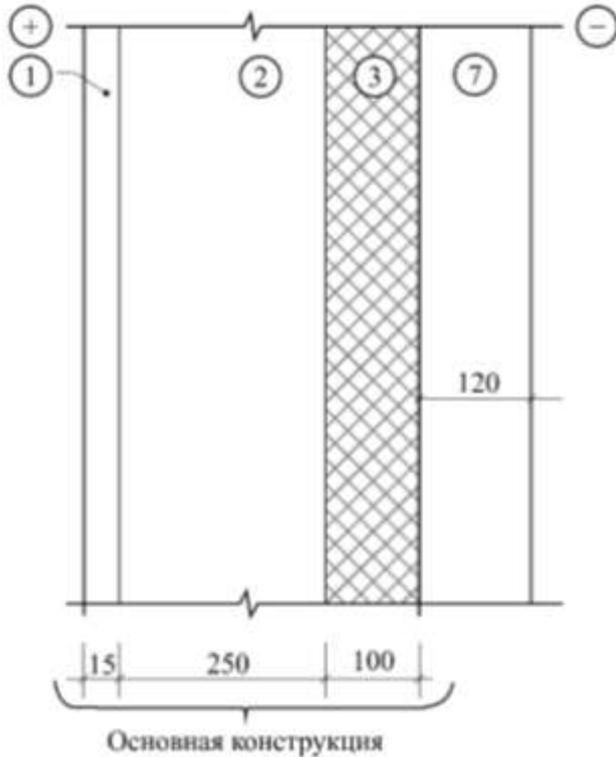


Рис. П2.6. Схема основной конструкции ограждения

Расчет теплотехнических параметров:

$$R_{\text{ТО}} = R_{\text{ТВ}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_7}{\lambda_7} + R_{\text{ТН}} =$$

$$= \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,12}{0,58} +$$

$$+ \frac{1}{23} = 3,1 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт ,}$$

$$R_{\text{Т,3/7}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} +$$

$$+ \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} =$$

$$= 2,85 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт ,}$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_7}{\mu_7} = \frac{0,015}{0,09} +$$

$$+ \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,12}{0,14} =$$

$$= 3,63 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг ,}$$

$$R_{\text{Т,н.п.}} = R_{\text{ТО}} - R_{\text{ТН}} = 3,1 - \frac{1}{23} =$$

$$= 3,06 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт .}$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{ПВ}}$ и $R_{\text{ПН}}$ при $t_{\text{Н}} = +4,2 \text{ °C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,1} \cdot 0,11 = 19,4 \text{ °C, } E_{\text{ВП}} = 2251 \text{ Па ,}$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2251 = 1126 \text{ Па ,}$$

$$\tau_{\text{Н}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,н.п.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,1} \cdot 3,06 = 4,4 \text{ °C, } E_{\text{НП}} = 836 \text{ Па ,}$$

$$e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па}$$

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1126 - 635}{3,63} = 135 \text{ мг / (м}^2 \cdot \text{ч) ,}$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1126}{135} = 0,32 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{НП}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{135} = 0,06 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,32 + 3,63 + 0,06 = 4,01 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{П,3/7}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 0,32 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} = 3,09 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Определение разности $(E_{3/7} - e_{3/7})$ по расчетному сечению 3/7:

• При температуре $t_{\text{Н,1}} = +4,2^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/7} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/7}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,1} \cdot 2,85 = 5,5^\circ\text{C}, \quad E_{3/7} = 904 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/7}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{4,01} \cdot 3,09 = 751 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/7} - e_{3/7}) = 904 - 751 = 153 \text{ Па} .$

• При температуре $t_{\text{Н,2}} = -11,6^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/7} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/7}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{3,1} \cdot 2,85 = -9,05^\circ\text{C}, \quad E_{3/7} = 284 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/7}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{4,01} \cdot 3,09 = 407 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/7} - e_{3/7}) = 284 - 407 = -123 \text{ Па} .$

• При температуре $t_{\text{Н,3}} = -21,8^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/7} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/7}} = 20 - \frac{20 + 21,8}{3,1} \cdot 2,85 = -18,4^\circ\text{C}, \quad E_{3/7} = 120 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/7}} = 1169 - \frac{1169 - 73}{4,01} \cdot 3,09 = 324 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/7} - e_{3/7}) = 120 - 324 = -204 \text{ Па} .$

Результаты расчета зависимости $(E_{3/7} - e_{3/7})$ от $t_{\text{Н}}$ для данного ограждения приведены на рисунке П2.8. Из рисунка следует, что температура начала конденсации водяного пара в ограждении по варианту 5 составляет: $t_{\text{НК}} = -3^\circ\text{C}$.

Вариант 6. Основная конструкция и 250 мм кирпичной кладки

Расчет теплотехнических параметров:

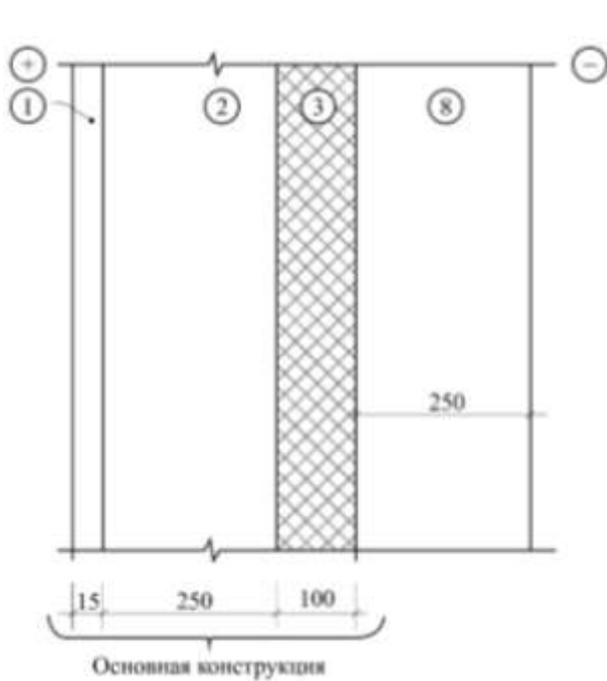


Рис. П2.7. Схема основной конструкции ограждения

$$R_{\text{ТО}} = R_{\text{ТВ}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_8}{\lambda_8} + R_{\text{ТН}} =$$

$$= \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,25}{0,58} +$$

$$+ \frac{1}{23} = 3,32 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/8}} = \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{1}{8,7} +$$

$$+ \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} =$$

$$= 2,85 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_8}{\mu_8} = \frac{0,015}{0,09} +$$

$$+ \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,25}{0,14} =$$

$$= 4,55 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг} ,$$

$$R_{\text{Т,н.п.}} = R_{\text{ТО}} - R_{\text{ТН}} = 3,32 - \frac{1}{23} =$$

$$= 3,28 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} .$$

Определение сопротивлений влагообмену $R_{\text{ПВ}}$ и $R_{\text{ПН}}$ при $t_{\text{Н}} = +4,2 \text{°C}$, то есть при отсутствии конденсации:

$$\tau_{\text{В}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{ТВ}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,32} \cdot 0,11 = 19,5 \text{°C}, E_{\text{ВП}} = 2266 \text{Па} ,$$

$$e_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot 2266 = 1133 \text{Па} ,$$

$$\tau_{\text{Н}} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,н.п.}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,32} \cdot 3,28 = 4,4 \text{°C}, E_{\text{НП}} = 836 \text{Па} ,$$

$$e_{\text{НП}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{Па} ,$$

$$G_{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВП}} - e_{\text{НП}}}{R_{\text{ПК}}} = \frac{1133 - 635}{4,55} = 109 \text{ мг} / \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \right) ,$$

$$R_{\text{ПВ}} = \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{ВП}}}{G_{\text{К}}} = \frac{1169 - 1133}{109} = 0,33 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{Мг} ,$$

$$R_{\text{ПН}} = \frac{e_{\text{ПН}} - e_{\text{Н}}}{G_{\text{К}}} = \frac{635 - 627}{109} = 0,07 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,33 + 4,55 + 0,07 = 4,95 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{П,3/7}} = R_{\text{ПВ}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 0,33 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} = 3,1 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Определение разности $(E_{3/8} - e_{3/8})$ по расчетному сечению 3/8:

• При температуре $t_{\text{Н,1}} = +4,2^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/8} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/8}} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,32} \cdot 2,85 = 6,4^\circ\text{C}, \quad E_{3/8} = 961 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/8} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/8}} = 1169 - \frac{1169 - 627}{4,95} \cdot 3,1 = 829 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/8} - e_{3/8}) = 961 - 829 = 132 \text{ Па} .$

• При температуре $t_{\text{Н,2}} = -11,6^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/8} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/8}} = 20 - \frac{20 + 11,6}{3,32} \cdot 2,85 = -7,1^\circ\text{C}, \quad E_{3/8} = 334 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/8} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/8}} = 1169 - \frac{1169 - 180}{4,95} \cdot 3,1 = 550 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/8} - e_{3/8}) = 334 - 550 = -216 \text{ Па} .$

• При температуре $t_{\text{Н,3}} = -21,8^\circ\text{C}$:

$$\tau_{3/8} = t_{\text{В}} - \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ТО}}} \cdot R_{\text{Т,3/8}} = 20 - \frac{20 + 21,8}{3,32} \cdot 2,85 = -15,9^\circ\text{C}, \quad E_{3/8} = 152 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/8} = e_{\text{В}} - \frac{e_{\text{В}} - e_{\text{Н}}}{R_{\text{ПО}}} \cdot R_{\text{П,3/8}} = 1169 - \frac{1169 - 73}{4,95} \cdot 3,1 = 483 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E_{3/8} - e_{3/8}) = 152 - 483 = -331 \text{ Па} .$

Результаты расчета зависимости $(E_{3/8} - e_{3/8})$ от $t_{\text{Н}}$ для данного ограждения приведены на рисунке П2.8. Из рисунка следует, что температура начала конденсации водяного пара в ограждении по варианту б составляет: $t_{\text{НК}} = \mp 0^\circ\text{C}$.

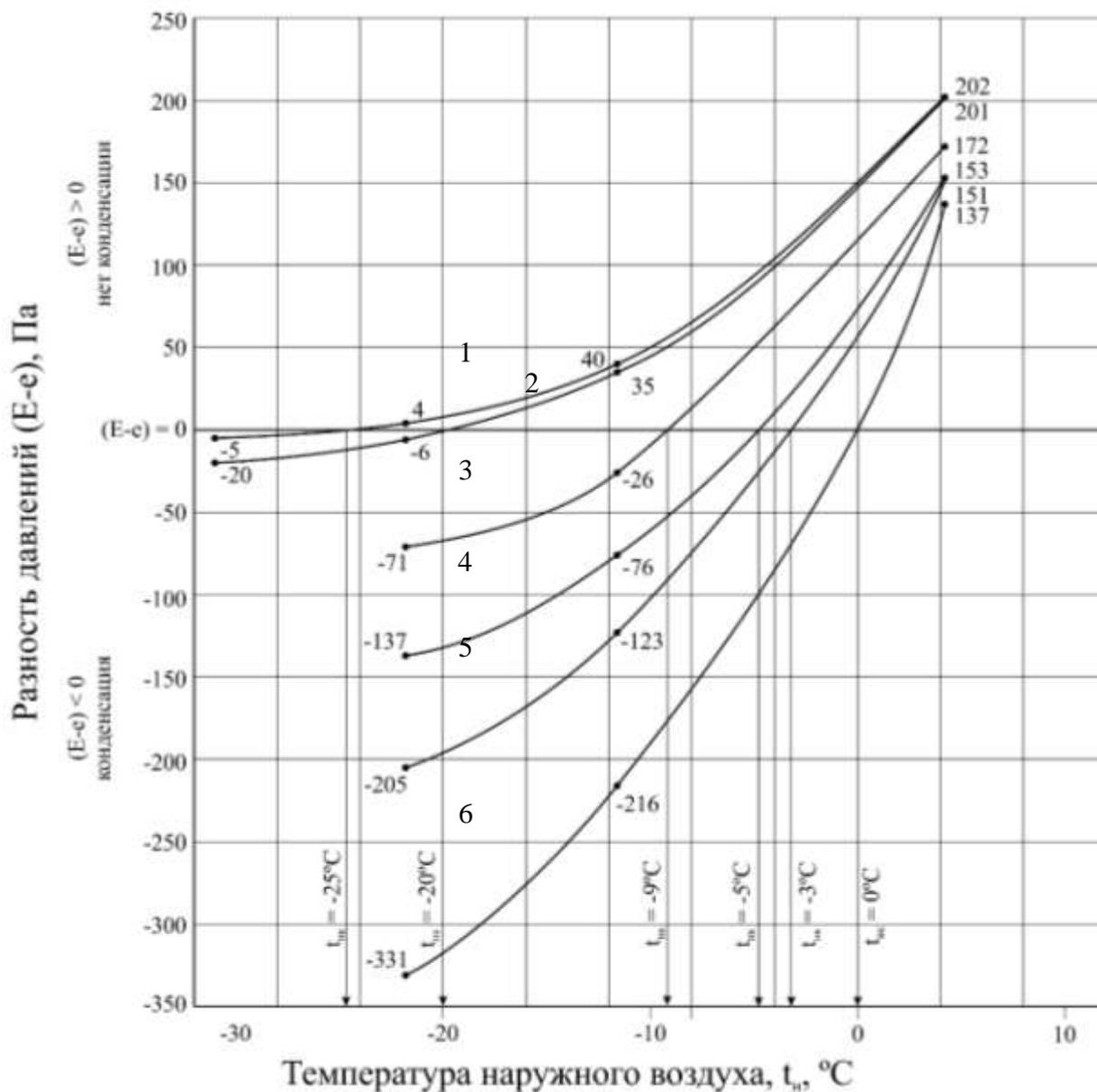


Рис. П2.8. Зависимость разности давлений (E-e) от t_n по расчетным сечениям шести вариантов ограждающих конструкций:

● – расчетные точки, 1, 2, 3... – номера вариантов ограждающих конструкций

Пересечение зависимости $(E - e)$ от t_n с горизонталью $(E - e) = 0$ указывает на температуру начала конденсации $t_{нк}$ для каждого варианта ограждающих конструкций.

Определение температуры начала конденсации $t_{\text{НК}}$ в ограждающих конструкциях по вариантам 4 и 5 с измененными значениями паропроницаемости основной конструкции $R_{\text{ПОК}}$

Вариант 4+. Кирпичная кладка с 250 мм увеличена до 380 мм.

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,38}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,01}{0,12} + \frac{1}{23} = 3,16 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/6}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,38}{0,87} + \frac{0,1}{0,041} = 3,04 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,38}{0,11} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,005}{0,02} = 4,45 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,29 + 4,45 + 0,05 = 4,79 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{МГ} .$$

Определение разности $(E - e)$ в сечении 3/6 при трех температурах наружного воздуха:

• При температуре $t_{\text{Н}} = +4,2 \text{°C}$:

$$\tau_{3/6} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,16} \cdot 3,04 = 4,8 \text{°C}, \quad E_{3/6} = 860 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/6} = 1169 - \frac{1169 - 627}{4,79} \cdot 3,03 = 689 \text{ Па} .$$

$$\text{Разность давлений } (E_{3/6} - e_{3/6}) = 860 - 689 = 171 \text{ Па} .$$

• При температуре $t_{\text{Н,2}} = -11,6 \text{°C}$:

$$\tau_{3/6} = 20 - \frac{20 + 11,6}{3,16} \cdot 3,04 = -10,4 \text{°C}, \quad E_{3/6} = 251 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/6} = 1169 - \frac{1169 - 180}{4,79} \cdot 4,24 = 293 \text{ Па} .$$

$$\text{Разность давлений } (E_{3/6} - e_{3/6}) = 251 - 293 = 42 \text{ Па} .$$

• При температуре $t_{\text{Н,3}} = -21,8 \text{°C}$:

$$\tau_{3/6} = 20 - \frac{20 + 21,8}{3,16} \cdot 3,04 = -20,2 \text{°C}, \quad E_{3/6} = 101 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/6} = 1169 - \frac{1169 - 73}{4,79} \cdot 4,24 = 199 \text{ Па} .$$

$$\text{Разность давлений } (E_{3/5} - e_{3/5}) = 101 - 199 = -98 \text{ Па} .$$

Вариант 4–. Кирпичная кладка заменена на керамзитобетон:
 $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,33 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\mu = 0,14 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$ с сохранением
толщины слоя в 250 мм.

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,33} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,01}{0,12} + \frac{1}{23} = 3,45 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/6}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,33} + \frac{0,1}{0,041} = 3,33 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,14} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,01}{0,02} = 2,78 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,29 + 2,78 + 0,05 = 3,15 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} ,$$

$$R_{\text{П,3/6}} = 0,29 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,14} + \frac{0,1}{0,3} = 2,57 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} .$$

Определение разности $(E - e)$ в сечении 3/6 при трех температурах
 наружного воздуха:

• $t_{\text{н}} = +4,2 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/6} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,45} \cdot 3,33 = 4,7 \text{ °C}, \quad E_{3/6} = 853 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/6} = 1169 - \frac{1169 - 627}{3,15} \cdot 2,57 = 727 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 853 - 727 = 126 \text{ Па} .$

• $t_{\text{н}} = -11,6 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/6} = 20 - \frac{20 + 11,6}{3,45} \cdot 3,33 = -10,5 \text{ °C}, \quad E_{3/6} = 248 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/6} = 1169 - \frac{1169 - 180}{3,15} \cdot 2,57 = 362 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 248 - 362 = -114 \text{ Па} .$

• $t_{\text{н}} = -21,8 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/6} = 20 - \frac{20 + 21,8}{3,45} \cdot 3,33 = -20,3 \text{ °C}, \quad E_{3/6} = 101 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/6} = 1169 - \frac{1169 - 73}{3,15} \cdot 2,57 = 247 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 101 - 247 = -146 \text{ Па} .$

Вариант 5. Кирпичная кладка заменена на 200 мм монолитного железобетона: $\rho_0 = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 2,04 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\mu = 0,03 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,2}{2,04} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,12}{0,58} + \frac{1}{23} = 2,91 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/7}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,2}{2,04} + \frac{0,1}{0,041} = 2,66 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,2}{0,03} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,12}{0,14} = 8,03 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,32 + 8,03 + 0,06 = 8,41 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} ,$$

$$R_{\text{П,3/7}} = 0,32 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,2}{0,03} + \frac{0,1}{0,3} = 7,49 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} .$$

Определение разности $(E - e)$ в сечении 3/7 при трех температурах наружного воздуха:

• $t_{\text{н}} = +4,2 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/7} = 20 - \frac{20 - 4,2}{2,91} \cdot 2,66 = 5,6 \text{ °C}, \quad E_{3/7} = 909 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = 1169 - \frac{1169 - 627}{8,41} \cdot 7,49 = 686 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 909 - 686 = 223 \text{ Па} ,$

• $t_{\text{н}} = -11,6 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/7} = 20 - \frac{20 + 11,6}{2,91} \cdot 2,66 = -8,9 \text{ °C}, \quad E_{3/7} = 286 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = 1169 - \frac{1169 - 180}{8,41} \cdot 7,49 = 288 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 286 - 288 = -2 \text{ Па} .$

• $t_{\text{н}} = -21,8 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/7} = 20 - \frac{20 + 21,8}{2,91} \cdot 2,66 = -18,2 \text{ °C}, \quad E_{3/7} = 123 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = 1169 - \frac{1169 - 73}{8,41} \cdot 7,49 = 193 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 123 - 193 = -70 \text{ Па} .$

Вариант 6. Кирпичная кладка толщиной 250 мм заменена на кладку из газобетонных блоков той же толщины: $\rho_0 = 400 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,14 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, $\mu = 0,23 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

$$R_{\text{ТО}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,14} + \frac{0,1}{0,041} + \frac{0,12}{0,58} + \frac{1}{23} = 4,6 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{Т,3/7}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,93} + \frac{0,25}{0,14} + \frac{0,1}{0,041} = 4,35 \left(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \right) / \text{Вт} ,$$

$$R_{\text{ПК}} = \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,23} + \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,12}{0,14} = 2,45 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} ,$$

$$R_{\text{ПО}} = R_{\text{ПВ}} + R_{\text{ПК}} + R_{\text{ПН}} = 0,32 + 2,45 + 0,06 = 2,83 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} ,$$

$$R_{\text{П,3/7}} = 0,32 + \frac{0,015}{0,09} + \frac{0,25}{0,23} + \frac{0,1}{0,3} = 1,91 \left(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} \right) / \text{мг} .$$

Определение разности $(E - e)$ в сечении 3/7 при трех температурах наружного воздуха:

• $t_{\text{н}} = +4,2 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/7} = 20 - \frac{20 - 4,2}{4,6} \cdot 4,35 = 5,06 \text{ °C}, \quad E_{3/7} = 872 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = 1169 - \frac{1169 - 627}{2,83} \cdot 1,91 = 803 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 872 - 803 = 69 \text{ Па} .$

• $t_{\text{н}} = -11,6 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/7} = 20 - \frac{20 + 11,6}{4,6} \cdot 4,35 = -9,9 \text{ °C}, \quad E_{3/7} = 262 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = 1169 - \frac{1169 - 180}{2,83} \cdot 1,91 = 501 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 262 - 501 = -239 \text{ Па} ,$

• $t_{\text{н}} = -21,8 \text{ °C}$:

$$\tau_{3/7} = 20 - \frac{20 + 21,8}{4,6} \cdot 4,35 = -19,5 \text{ °C}, \quad E_{3/7} = 108 \text{ Па} ,$$

$$e_{3/7} = 1169 - \frac{1169 - 73}{2,83} \cdot 1,91 = 429 \text{ Па} .$$

Разность давлений $(E - e) = 108 - 429 = -321 \text{ Па} .$

Разность давлений водяного пара $(E - e)$ по вариантам ограждающих конструкций 4+, 4-, 5+, 5- в зависимости от температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$ представлена на рисунке П2.9.

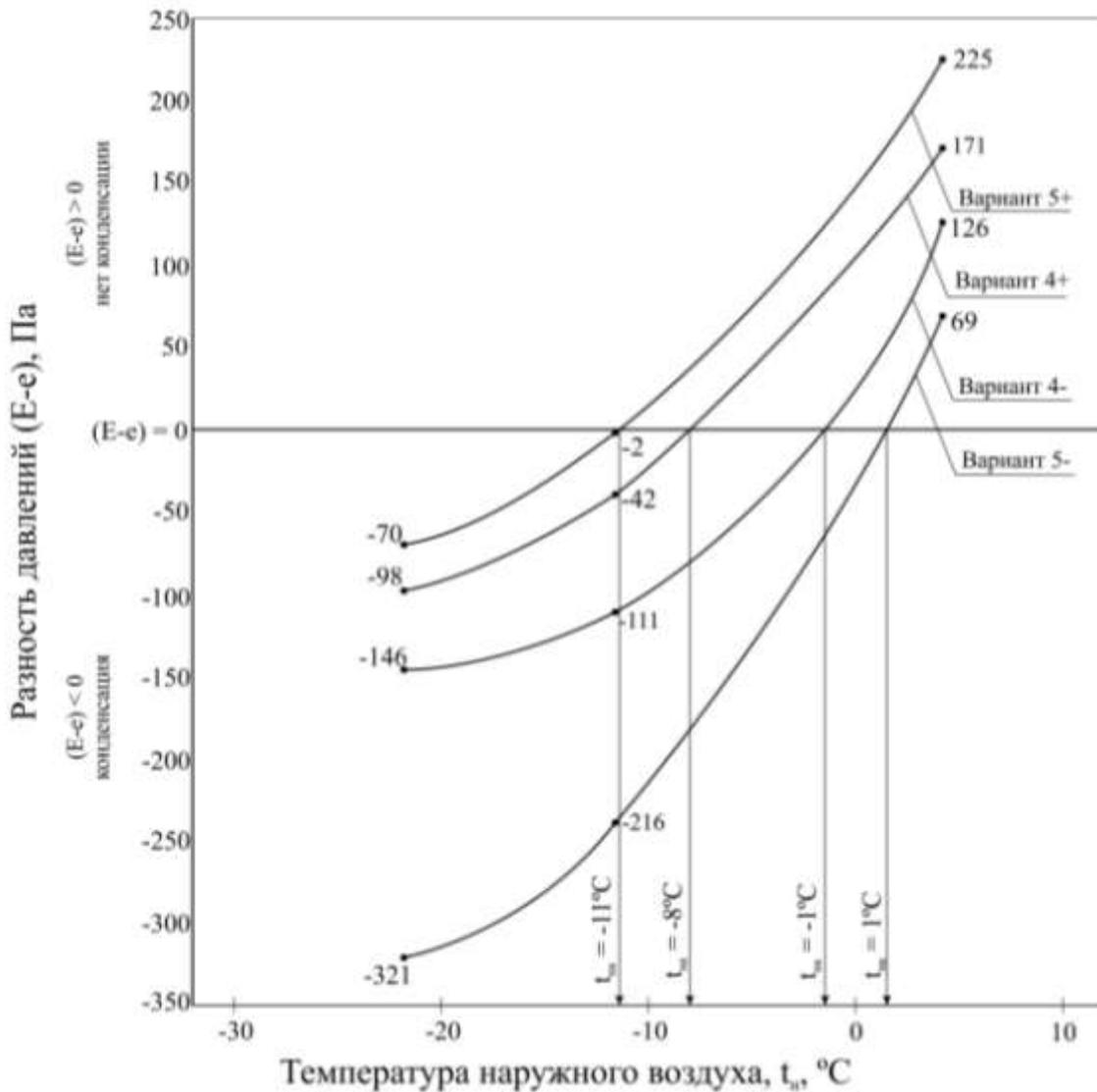


Рис. П2.9. Зависимость разности давлений $(E-e)$ от t_n по измененным вариантам ограждающих конструкций 4+, 4-, 5+, 5-

Из рисунка П2.9 следует, что изменение свойств материальных слоев в базовых вариантах 4 и 5 привело к изменению t_{HK} в каждом новом варианте ограждающих конструкций. Вариант 4+, $t_{HK} = -8^\circ C$, Вариант 4-, $t_{HK} = -1^\circ C$, Вариант 5+, $t_{HK} = -11^\circ C$, Вариант 5-, $t_{HK} = +1^\circ C$.

Эти результаты еще раз подтвердили высказанное ранее предположение о том, что каждая ограждающая конструкция имеет собственную температуру начала конденсации.

Средняя продолжительность периода с температурой наружного воздуха различных градаций для некоторых городов России (в часах) (выборка из [32])

Таблица П3.1

Температура воздуха, °С	Анадырь	Архангельск	Архара (Амурская область)	Владивосток	Вологда	Воронеж
-46 , -44,1						
-44 , -42,1						
-42 , -40,1			9			
-40 , -38,1	35		18			
-38 , -36,1	70	9	53			
-36 , -34,1	105	18	96		9	
-34 , -32,1	149	18	140		18	
-32 , -30,1	228	35	175		18	
-30 , -28,1	245	70	237		44	
-28 , -26,1	254	88	254		44	9
-26 , -24,1	289	96	280		61	26
-24 , -22,1	298	114	272	18	88	35
-22 , -20,1	324	123	263	79	114	61
-20 , -18,1	351	131	245	131	105	88
-18 , -16,1	342	175	237	228	149	114
-16 , -14,1	351	184	219	298	158	158
-14 , -12,1	342	228	202	316	193	166
-12 , -10,1	316	272	210	377	245	193
-10 , -8,1	307	324	201	333	289	245
-8 , -6,1	342	394	210	307	342	307
-6 , -4,1	386	465	219	316	429	342
-4 , -2,1	412	543	228	351	482	386
-2 , -0,1	447	701	254	412	631	588
0-1,9	482	806	298	438	797	780
2-3,9	394	561	298	438	508	429
4-5,9	421	473	289	447	465	386
6-7,9	473	465	307	447	456	386
8-9,9	552	456	342	500	465	421
10-11,9	412	430	351	508	473	491
12-13,9	228	394	386	578	508	517
14-15,9	105	351	465	587	482	561
16-17,9	61	280	491	614	359	535
18-19,9	35	193	456	508	280	429
20-21,9	9	149	377	307	228	377

Продолжение таблицы ПЗ.1

Температура воздуха, °С	Казань	Красноярск	Курган	Курск	Магадан	Москва
Ниже -38		27	18			
-38 , -36,1		26	26			
-36 , -34,1		44	35			
-34 , -32,1	18	61	44			
-32 , -30,1	26	88	61		18	
-30 , -28,1	35	96	70		26	9
-28 , -26,1	44	105	96	9	79	18
-26 , -24,1	70	123	123	18	131	26
-24 , -22,1	79	158	149	35	210	35
-22 , -20,1	114	175	175	44	298	70
-20 , -18,1	140	175	201	70	333	88
-18 , -16,1	158	201	245	114	421	114
-16 , -14,1	201	245	254	130	456	131
-14 , -12,1	245	272	272	158	421	166
-12 , -10,1	280	316	307	228	438	228
-10 , -8,1	324	342	298	237	429	254
-8 , -6,1	342	386	324	307	429	316
-6 , -4,1	394	394	333	350	473	368
-4 , -2,1	448	412	386	438	456	465
-2 , -0,1	526	438	438	754	447	570
0-1,9	657	491	447	719	456	789
2-3,9	377	412	342	386	386	526
4-5,9	359	394	333	403	429	447
6-7,9	351	377	342	403	526	429
8-9,9	368	403.	394	412	640	465
10-11,9	421	429	447	500	666	517
12-13,9	482	456	456	570	351	561
14-15,9	500	421	438	614	166	543
16-17,9	500	394	438	552	62	500
18-19,9	412	307	342	420	18	368
20-21,9	307	237	280	359		298
22-23,9	245	166	219	245		19
24-25,9	158	70	193	158		131
26-27,9	184	70	123	88		114
Выше 28		54	104	44		

Продолжение таблицы ПЗ.1

Температура воздуха, °С	Омск	Оренбург	Псков	Пятигорск	Самара	Санкт- Петербург
Ниже-40	9					
-40 , -38,1	18					
-38 , -36,1	35					
-36 , -34,1	44	9				
-34 , -32,1	61	18				
-32 , -30,1	79	18			9	
-30 , -28,1	88	35	9		26	
-28 , -26,1	96	44	18		35	9
-26 , -24,1	131	96	26		44	26
-24 , -22,1	158	114	26	9	70	44
-22 , -20,1	184	149	53	9	96	53
-20 , -18,1	219	166	70	18	140	61
-18 , -16,1	254	228	105	35	196	79
-16 , -14,1	289	228	105	44	201	123
-14 , -12,1	307	228	140	70	272	140
-12 , -10,1	307	272	184	96	289	193
-10 , -8,1	316	254	228	114	289	219
-8 , -6,1	324	316	298	210	342	316
-6 , -4,1	333	351	359	333	377	376
-4 , -2,1	324	386	447	482	438	438
-2 , -0,1	421	526	578	587	508	587
0-1,9	456	535	938	596	578	876
2-3,9	351	316	614	517	342	719
4-5,9	342	289	500	491	324	535
6-7,9	351	307	500	447	333	456
8-9,9	359	307	526	473	316	465
10-11,9	421	350	543	517	386	500
12-13,9	456	402	570	570	438	543
14-15,9	456	438	517	648	473	570
16-17,9	403	438	438	614	535	482
18-19,9	342	437	351	561	482	377
20-21,9	272	386	245	429	394	254
22-23,9	219	324	193	351	307	175
24-25,9	149	272	114	254	228	96
Выше 26	191	368	52	158	149	35

Продолжение таблицы ПЗ.1

Температура воздуха, °С	Екатеринбург	Смоленск	Сургут	Сыктывкар	Тобольск	Томск
Ниже -42			45		18	18
-42 , -40,1			44	9	18	26
-40 , -38,1	9		70	9	26	35
-38 , -36,1	9		70	18	53	44
-36 , -34,1	26		88	26	53	53
-34 , -32,1	26		105	44	70	53
-32 , -30,1	44		105	53	70	79
-30 , -28,1	61	18	131	70	88	96
-28 , -26,1	79	18	149	70	123	114
-26 , -24,1	96,	44	184	96	131	140
-24 , -22,1	123	79	184	123	166	158
-22 , -20,1	149	88	210	149	210	193
-20 , -18,1	201	105	237	166	245	228
-18 , -16,1	254	123	272	184	237	245
-16 , -14,1	289	158	289	228	263	263
-14 , -12,1	351	228	307	254	254	272
-12 , -10,1	368	237	333	289	298	333
-10 , -8,1	378	324	324	324	280	298
-8 , -6,1	422	351	333	412	333	324
-6 , -4,1	439	447	342	456	377	333
-4 , -2,1	482	762	333	517	351	377
-2 , -0,1	491	850	394	543	429	447
0-1,9	403	465	526	683	508	465
2-3,9	377	429	421	456	412	386
4-5,9	412	473	342	456	333	368
6-7,9	465	517	368	429	386	377
8-9,9	473	552	386	456	421	412
10-11,9	465	578	429	465	482	438
12-13,9	447	552	403	412	456	429
14-15,9	429	465	394	377	438	429
16-17,9	333	351	298	307	359	368
18-19,9	245	263	245	237	280	307
20-21,9	201	166	184	158	228	228
22-23,9	131	96	131	131	158	166
Выше 24	87	26	87	158	211	253

Окончание таблицы ПЗ.1

Температура воздуха, °С	Улан-Удэ	Ижевск	Усть-Мая – Республика Саха (Якутия)	Усть-Цильма – Республика Коми	Уфа	Хабаровск
Ниже -42			938	18		
-42 , -40,1			272	26	9	
-40 , -38,1	18		245	26	9	
-38 , -36,1	26		237	35	18	
-36 , -34,1	53	18	237	53	26	
-34 , -32,1	79	26	228	61	26	9
-32 , -30,1	131	26	210	70	44	18
-30 , -28,1	184	44	201	79	61	53
-28 , -26,1	219	61	175	105	79	149
-26 , -24,1	245	88	166	140	96	184
-24 , -22,1	263	96	140	166	105	272
-22 , -20,1	289	114	131	193	140	324
-20 , -18,1	289	166	131	228	166	351
-18 , -16,1	289	193	131	254	193	342
-16 , -14,1	254	237	140	263	201	333
-14 , -12,1	263	263	140	272	210	271
-12 , -10,1	280	316	158	333	280	254
-10 , -8,1	245	324	149	333	298	245
-8 , -6,1	263	394	166	421	307	228
-6 , -4,1	280	412	175	508	386	245
-4 , -2,1	324	456	219	543	421	245
-2 , -0,1	359	543	298	622	491	280
0-1,9	359	614	307	666	614	316
2-3,9	333	377	298	473	394	307
4-5,9	324	342	333	429	359	307
6-7,9	316	377	360	456	351	307
8-9,9	377	412	369	412	403	333
10-11,9	394	438	369	368	447	368
12-13,9	403	456	378	324	482	421
14-15,9	421	465	377	273	438	465
16-17,9	386	403	316	194	456	517
18-19,9	316	351	245	158	351	491
20-21,9	237	263	193	105	272	403
22-23,9	193	193	131	70	237	298
Выше 24	353	291	202	88	295	429

Библиографический список

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий
2. СНиП II-A.7-62. Строительная теплотехника. Нормы проектирования
3. СНиП II-A.7-71. Строительная теплотехника
4. СНиП II-A.6-72. Строительная климатология и геофизика
5. СНиП II-3-79. Строительная теплотехника
6. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника, 1995
7. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий
8. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий
9. СП 345.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты
10. Куприянов В.Н., Иванцов А.И. К определению оптимальной долговечности ограждающих конструкций жилых зданий массовой застройки // Известия КГАСУ, Казань, 2013, № 2 (24), С. 118–125
11. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд-е 5-е, пересмотренное. Москва: Изд-во «АВОК-ПРЕСС». 2006.– 256 с.
12. Иванцов А.И. Натурные исследования эксплуатационных воздействий на фасадные системы с различными видами эффективных утеплителей /А.И. Иванцов, В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин // «Жилищное строительство», Москва, 2013, № 7, С. 29–32
13. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Паропроницаемость и проектирование ограждающих конструкций // Журнал АСADEMIA «Строительство и архитектура», 2010, № 3, С. 385–390
14. Петров А.С., Куприянов В.Н. Влияние температурно-влажностных условий эксплуатации строительных материалов на их паропроницаемость // Известия КГАСУ, Казань. 2015, № 1 (31), С. 92–98
15. Куприянов В.Н. К вопросу о паропроницаемости ограждающих конструкций/ В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, А.Г. Хабибуллина // Журнал АСADEMIA «Строительство и архитектура», 2010, № 3, С. 385–390
16. Куприянов В.Н. Совершенствование метода расчета по защите от переувлажнения ограждающих конструкций //«Жилищное строительство», Москва, 2017, № 5, С. 38–43
17. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Учебник для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп.– Москва: Высшая школа, 1982.– 415 с.

18. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. Учебное пособие.– Москва: Высшая школа, 1974.– 320 с.
19. Куприянов В.Н. К определению влагообмена на поверхностях ограждающих конструкций при переносе через них водяного пара // Вестник ПТО РААСН, 2022, № 25
20. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. К определению температуры начала конденсации парообразной влаги в наружных стенах // Вестник ВРО РАСН.– Нижний Новгород, 2014, № 17, С. 275–282
21. Куприянов В.Н. Климатология и физика архитектурной среды.– Москва, Издательство АСВ, 2016.– 194 с.
22. Куприянов В.Н. Влияние конструкции ограждения на конденсацию парообразной влаги /В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, М.Р. Шамсутдинов //«Жилищное строительство», Москва, 2012, № 6, С. 29–31
23. СТО00044807-001-2006. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий (РОИС, стандарт организации)
24. Роджерс Т.С. Проектирование тепловой защиты зданий.– Пер. с англ. – Москва: Стройиздат, 1966.– 228 с.
25. Строительная физика / Е. Шильд, Х.-Ф. Кассельман, Г. Дамен, Р. Поленц, пер. с нем.– Москва: Стройиздат, 1982. – 296 с.
26. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Расчетно-экспериментальное исследование увлажнения ограждающих конструкций парообразной влагой // Вестник ВРО РААСН.– Н. Новгород, 2011, вып. 14, С. 183–187
27. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Экспериментальное исследование увлажнения парообразной влагой фрагментов ограждения в климатической камере // Вестник МГСУ, Москва, 2011, № 3, том 2, С. 166–171
28. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Количественные параметры конденсации парообразной влаги в наружных стенах // Известия КГАСУ, Казань, 2013, № 4 (26), С. 121–128
29. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Влияние конструкций наружных стен на объем конденсата и снижение теплозащитных свойств //Труды XIV Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», 18–20 марта 2014 г., Казань, С. 521–525
30. Куприянов В.Н. Основные принципы конструирования наружных стен с ограничением конденсации в них парообразной влаги // «Строительство и реконструкция», научно-технический журнал, г. Орел, ФГБОУ ВПО «Госунiversитет УНПУ», 2015, № 2(85), С. 120–127

31. Куприянов В.Н. К расчету конденсата в ограждающих конструкциях // Сб. научных трудов РААСН за 2020, г. Москва: Издательство АСВ, 2021, том 2, С. 273–287
32. Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01-99* /под ред. В.К. Савина.– Москва: НИИ строительной физики РААСН, 2006.– 258 с.
33. Лобов О.И., Ананьев А.И. Долговечность наружных стен современных многоэтажных зданий // Жилищное строительство, 2008, № 8, С. 48–52
34. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Влияние наружных облицовочных слоев на процесс конденсации парообразной влаги в ограждающих конструкциях //Приволжский научный журнал, ННГАСУ.– Н. Новгород, 2014, № 1, С. 46–50
35. Petrov A.S. Kupriyanov V.N. Determination of Humidity Conditions of Enclosing Structures by the Color Indicator Method // Журнал «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering» 2018, #463 (2018) 022064. doi: 10.1088/1757 - 899X/463/2/022064
36. Куприянов В.Н. Прогнозирование переувлажнения ограждающих конструкций при конденсации в них водяного пара // Приволжский научный журнал, 2021, № 2, С. 84–90
37. Kupriyanov V.N. Dewpoint temperature as overwetting indicator of enclosing structures // E35 Web of Conferences, 274.07002 (2021)
38. Куприянов В.Н., Петров А.С. Сопротивление паропрооницанию ограждающих конструкций и его влияние на конденсацию водяного пара // Вестник ПТО РААСН.– Нижний Новгород, 2017, вып. 20, С. 187–192
39. Куприянов В.Н., Юзмухаметов А.М. Разработка математической модели теплопроводности сухой и влажной минеральной ваты // «Строительные материалы», Москва, 2018, № 11, С. 68–72
40. Петров А.С. Определение характера увлажнения ограждающих конструкций экспериментальным методом цветовой индикации /А.С. Петров, А.М. Юзмухаметов, В.Н. Куприянов, К.С. Андрейцева //«Строительные материалы», Москва, 2019, № 6, С. 24–28
41. Petrov A.S. Kupriyanov V.N. Study of the Dependence of Equilibrium Sorption Humidity of Heat-insulating Products on Temperature //E35 Web of Conferences, 2021, 274.04008

42. Куприянов В.Н., Петров А.С. Влияние различной скорости движения воздуха на паропроницаемость материалов //«Строительные материалы», 2013, № 6, С.20–21
43. Куприянов В.Н., Петров А.С. Влажностное состояние ограждающих конструкций с учетом переменного значения паропроницаемости материалов //«Строительные материалы», 2016, № 6, С.40–43
44. Петров А.С., Куприянов В.Н., Переменное значение паропроницаемости материалов в условиях эксплуатации и его влияние на прогнозирование влажностного состояния ограждающих конструкций //ACADEMIA «Строительство и архитектура», 2010, № 3, С. 385–390
45. Petrov A.S. Kupriyanov V.N. About operational factor influence on vapor permeability of heat insulating materials //International Journal of Pharmacy & Technology, 2016, № 1, Vol.8.-p.11248-11256.
46. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Проектирование ограждающих конструкций с учетом диффузии и конденсации парообразной влаги. // Известия КГАСУ, Казань, 2011, № 1(15), С. 93–103
47. Куприянов В.Н., Петров А.С. Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным // Известия КГАСУ, Казань, 2013, № 2(24), С. 126–131
48. Куприянов В.Н., Иванцов А.И. Конденсация парообразной влаги в наружных стенах при суточных колебаниях температуры наружного воздуха // Приволжский научный журнал, Н. Новгород, ННГАСУ, 2013, № 2, С. 36–44
49. Куприянов В.Н. Исследование закономерностей переноса водяного пара через ограждение на модельных образцах / В.Н. Куприянов, А.М. Юзмухаметов, И.Ш. Сафин // Вестник ПТО РААСН, Нижний Новгород, 2018, № 21, С. 169–175
50. Куприянов В.Н. Оценка и регулирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях // Известия КГАСУ, Казань, 2022, № 1(59)
51. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Ч. 1–6, вып. 12. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988
52. Блэзи В. Справочник проектировщика. Строительная физика.– М.: Техносфера, 2012. – 616 с.

Содержание

Предисловие.....	3
1. ПЕРЕНОС ТЕПЛА И ВОДЯНОГО ПАРА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ.	4
1.1. Обеспечение теплозащиты зданий.....	5
1.2. Защита от переувлажнения ограждающих конструкций.....	5
1.3. Ошибки проектных решений и их последствия.	7
2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ	11
2.1. Влажность воздуха и температура точки росы.....	11
2.2. Графоаналитический метод Фокина	15
2.3. Неточности и неопределенности метода Фокина.....	22
3. НОВЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ.	23
3.1. Определение сопротивлений влагообмену у поверхностей ограждения.....	23
3.2. Определение температуры начала конденсации.	30
3.3. Определение количества конденсата в ограждающих конструкциях.	40
3.3.1. Выбор расчетной схемы.	40
3.3.2. Расчет количества конденсата.	42
4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА КОНДЕНСАЦИИ.	53
4.1. Влияние сопротивления теплопередаче	53
4.2. Влияние последовательности расположения материальных слоев.....	57
4.3. Влияние наружных слоев.	62
4.4. Влияние сопротивления паропроницанию ограждения.	66
5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ОГРАНИЧЕНИЕМ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА	70
Заключение.	77
Приложение 1. Определение температуры начала конденсации в трех типах ограждающих конструкций.	78
Приложение 2. Определение влияния наружных слоев ограждений на температуру начала конденсации водяного пара.....	86
Приложение 3. Средняя продолжительность периода с температурой наружного воздуха различных градаций для некоторых городов России (в часах).....	106
Библиографический список.	111

Куприянов Валерий Николаевич

**КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Монография