

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Кафедра теплоэнергетики,
газоснабжения и вентиляции

КУРСОВАЯ РАБОТА

По дисциплине: теплофизика зданий

№ зачетной книжки: 0717084

Выполнил: студент группы 7ТВ02

Минибаева Лейла Айратовна

Защищена _____

С оценкой _____

Проверил:

Крайнов Дмитрий Владимирович

Подпись _____

Казань 2019

Оглавление

Введение	3
1. Расчет теплового режима ограждения	6
1.1. Определение нормативных требований.....	6
1.2 Расчет толщины утепляющего слоя	7
1.3. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции.....	8
1.4 Проверка нормативных требований.....	10
2. Расчет сопротивления воздухопроницанию ограждающей конструкции. .	11
3. Расчет стационарного температурного поля в ограждении.....	13
3.1. Расчет одномерного стационарного температурного поля.....	13
3.1.1. Расчет без учета фильтрации воздуха.	13
3.1.2. Расчет с учетом фильтрации воздуха.	14
3.2. Расчет двумерного стационарного температурного поля.	17
4. Расчет теплоустойчивости.	18
5. Расчет влажностного режима.	21
5.1. Определение температуры точки росы.	21
5.2. Проверка внутренней поверхности наружных ограждений на возможность конденсации влаги в зоне теплопроводного включения.	22
5.3. Проверка нормативных требований по защите от переувлажнения ограждающих конструкций.	23
5.4. Расчет конденсации влаги в толще ограждения.	28
Заключение	32
Список литературы	33

						ИСТИЭС КР 19 23		
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата			
Разработал	Минибаева						Лит	Лист
Проверил	Крайнов							Листов
								2
								33
						гр. 7ТВ02		

Введение

Строительная теплофизика – раздел строительной науки и техники, в котором рассматривается тепломассообмен в зданиях, сооружениях, ограждающих конструкциях, системах обеспечения микроклимата, в процессах изготовления строительных материалов, конструкций и изделий, при взаимодействии инженерных систем сезоннопромерзающими или многолетнемерзлыми грунтами. Строительная теплофизика – теоретическая основа строительства. Она находится на стыке строительства и энергетики, поэтому в ней широко используются теории строительных конструкций, тепломассообмена, термодинамики, климатологии, санитарии, гигиены.

Курсовая работа по дисциплине «Теплофизика зданий» включает расчет тепловой защиты, защиты от переувлажнения ограждающих конструкций, расчет на воздухопроницаемость и теплоустойчивость ограждающих конструкций. Она выполняется в соответствии с требованиями нормативной документации.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							3
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Задание к курсовой работе:

Выполнить расчеты многослойного наружного ограждения для пятиэтажного жилого дома.

Вариант: 84

Район строительства: г. Тюмень

Таблица 1

Геометрические размеры фасада здания и оконных проемов

Н этажа, мм	L здания, мм	ОК 1		ОК 2	
		L, мм	H, мм	L, мм	H, мм
2700	21000	1200	1350	1800	1350

Таблица 2

Тип и материалы ограждающей конструкции

Толщина слоя			Номер материала слоя				Тип наружного ограждения
δ_1	δ_2	δ_4	1	2	3	4	
0,015	0,38	0,12	202	188	31	182	2

Тип наружного ограждения: несущая стеновая конструкция с облицовкой из кирпичной кладки.

Таблица 3

Исходные данные и теплотехнические характеристики материалов конструкции наружного ограждения.

Номер слоя	Материал слоя	Характеристики материала в сухом состоянии			Расчетные характеристики материала (при условиях эксплуатации Б)			
		Плотность ρ_0 , кг/м ³	Удельная теплоемкость c_0 , кДж/(кг*°C)	Теплопро- водность λ_0 , Вт/(м*°C)	Влажность W, %	Теплопро- водность λ , Вт/(м*°C)	Тепло усвоение s, Вт/(м ² *°C)	Паропро- ницаемость μ , мг/(м*ч*Па)
1	202	1700	0,84	0,52	2	0,7	8,95	0,098
2	188	1400	0,88	0,41	1	0,52	7,01	0,16
3	31	75	0,84	0,04	2	0,042	0,46	0,5
4	182	1600	0,88	0,47	2	0,58	8,08	0,15

202 – Раствор сложный (песок, известь, цемент)

188 – Кирпичная кладка из пустотного кирпича керамического пустотного на цементно-песчаном растворе

31 – Плиты из стеклянного штапельного волокна

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							4
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

182 - Кирпичная кладка из сплошного кирпича глиняного обыкновенного на цементно-перлитовом растворе

Расчетные коэффициенты следует принимать при условиях эксплуатации конструкций А и Б. Условия эксплуатации конструкций определяются в зависимости от влажностного режима помещений и зоны влажности района строительства.

Влажностный режим помещений зданий в холодный период года в зависимости от относительной влажности и температуры внутреннего воздуха следует устанавливать по таблице 4.

Таблица 4

Влажностный режим помещений зданий

Режим	Влажность внутреннего воздуха, %, при температуре, °С		
	До 12	Свыше 12 до 24	Свыше 24
Сухой	До 60	До 50	До 40
Нормальный	Свыше 60 до 75	Свыше 50 до 60	Свыше 40 до 50
Влажный	Свыше 75	Свыше 60 до 75	Свыше 50 до 60
Мокрый	-	Свыше 75	Свыше 60

Зоны влажности района строительства следует принимать по карте.

Условия эксплуатации ограждающих конструкций А или Б в зависимости от влажностного режима помещений и зон влажности района строительства, необходимые для выбора теплотехнических показателей материалов наружных ограждений, следует устанавливать по таблице 5.

Таблица 5

Условия эксплуатации ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений зданий	Условия эксплуатации А и Б в зоне влажности		
	Сухой	Нормальной	Влажной
Сухой	А	А	Б
Нормальный	А	Б	Б
Влажный или мокрый	Б	Б	Б

Для Тюмени влажностный режим помещений зданий: нормальный

Условия эксплуатации ограждающих конструкций: А

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							5
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

1. Расчет теплового режима ограждения

1.1. Определение нормативных требований

Теплозащитная оболочка здания должна отвечать следующим требованиям:

а) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования);

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

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

Требования тепловой защиты здания будут выполнены при одновременном выполнении требований а), б) и в).

В рамках данной курсовой работы проверяются выполнение требований а) и в). Комплексное требование не проверяется.

Необходимо проверить выполнение 2 условий:

$$R_o^{пр} \geq R_o^{норм} \quad (1.1)$$

$$R_o^{пр} \geq R_o^{тр} \quad (1.2)$$

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции $R_o^{норм}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, следует определять по формуле:

$$R_o^{норм} = R_o^{тр} \cdot m_p \quad (1.3)$$

где $R_o^{тр}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, следует принимать в зависимости от градусо-суток отопительного периода, ГСОП, $\text{°C} \cdot \text{сут}/\text{год}$, региона строительства.

m_p – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства. В расчете по формуле (1.3) принимается равным 1.

$$R_o^{тр} = a \cdot \text{ГСОП} + b \quad (1.4)$$

Градусо-сутки отопительного периода определяются по формуле:

$$\text{ГСОП} = (t_v - t_{от}) \cdot z_{от} \quad (1.5)$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							6
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

где $t_{от}$, $z_{от}$ – средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут/год, отопительного периода.

$t_{в}$ – расчетная температура внутреннего воздуха здания, °С

Нормируемое значение сопротивления теплопередаче стен допускается определять по формуле:

$$R_o^{норм} = \frac{(t_{в} - t_{н})}{\Delta t^H \cdot \alpha_{в}} \quad (1.6)$$

$t_{н}$ – расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °С

Δt^H – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха $t_{в}$ и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции $t_{вн}$, °С

$\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, Вт/(м²·°С)

Исходя из наших данных получим:

$$t_{в} = 20^{\circ}\text{C} \quad t_{н} = -35^{\circ}\text{C} \quad \Delta t^H = 4^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$R_o^{норм} = \frac{20 - (-35)}{4 \cdot 8,7} = 1,58 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}/\text{Вт}$$

$$t_{от} = -6,9^{\circ} \quad z_{от} = 223 \text{ сут}$$

$$\text{ГСОП} = (20 + 6,9) \cdot 223 = 5999^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}/\text{год}$$

$$a = 0,00035 \quad b = 1,4$$

$$R_o^{тр} = 0,00035 \cdot 5999 + 1,4 = 3,5 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}/\text{Вт}$$

$$R_o^{норм} = R_o^{тр} * 1 = 2,9 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}/\text{Вт}$$

1.2 Расчет толщины утепляющего слоя

Для плоских элементов выбирают толщину утеплителя. Для этого целевое сопротивление теплопередаче конструкции умножают на повышающий коэффициент и подбирают конструкцию со значением:

$R_o^{усл} = 1,5R_{ц}$ – в том числе для несущей стеновой конструкции с облицовкой из кирпичной кладки;

$R_o^{усл} = 1,3R_{ц}$ – в случае, если про конструкцию известно, что она отличается высокой однородностью (в том числе для фасадных систем с тонким штукатурным слоем);

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							7
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

$R_0^{ysl} = 1,8R_{ц}$ – в случае, если про конструкцию известно, что она отличается низкой однородностью. Используя формулу

$$R_0^{ysl} = \frac{1}{\alpha_B} + R_K + \frac{1}{\alpha_H} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_H} \quad (1.7)$$

найдем δ_3 :

$$\delta_3 = \left(R_0^{ysl} - \frac{1}{\alpha_B} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{\delta_2}{\lambda_2} - \frac{\delta_4}{\lambda_4} - \frac{1}{\alpha_H} \right) * \lambda_3$$

Вычисленное значение δ_3 должно быть скорректировано в соответствии с требованиями унификации конструкции ограждений, поэтому за δ_3 принимают ближайшее большее стандартное значение.

Согласно нашим данным:

$$R_{ц} = 3,5 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

$$R_{ysl} = R_{ц} * 1,5 = 5,25 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

$$\delta_3 = 5,25 - 0,115 - 0,021 - 0,731 - 0,21 - 0,043) * 0,042 = 0,17 \text{ м}$$

Ближайшее большее стандартное значение – 0.2 м

Пересчитаем $R_0^{ysl} = 0,015 + 0,021 + 0,731 + 0,21 + 0,043 + 4,76 = 5,8 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$

1.3. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания следует определять по формуле:

$$R_0^{pp} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i U_i + \sum_{j=1}^m l_j \psi_j + \sum_{k=1}^r n_k \chi_k}$$

где a_i – удельный геометрический показатель i -го плоского элемента, $\text{м}^2/\text{м}^2$. Равен отношению площади i -го элемента в исследуемой конструкции, A_i , м^2 , к общей площади конструкции, A , м^2 :

$$a_i = \frac{A_i}{A} \quad (1.6)$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							8
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

l_j – удельный геометрический показатель j -го линейного элемента, м/м². Равен отношению суммарной протяженности j -го элемента, L_j , м, к общей площади конструкции, A , м²:

$$l_j = \frac{L_j}{A} \quad (1.7)$$

n_k – удельная геометрическая показатель k -го точечного элемента, 1/м². Равен отношению суммарного количества k -ых элементов в исследуемой конструкции, N_k , к общей площади конструкции, A , м²:

$$n_k = \frac{N_k}{A} \quad (1.8)$$

Ψ_j – удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида, Вт/(м·°С);

χ_k – удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, Вт/°С;

U_i – коэффициент теплопередачи однородной i -той части фрагмента теплозащитной оболочки здания (удельные потери теплоты через плоский элемент i -го вида), Вт/(м²·°С). Определяется по формуле: $U_i = \frac{1}{R_{0\text{ усл}}}$ (1.9)

Таблица 6

Геометрические и теплозащитные характеристики элементов

Элемент	Тип	Геометрический	Теплопотери	Удельн. Т/П	%
Стена	Пл. 1	1	0,17	0,17	45,4
Плита перекрытия	Лин. 1	0, 63	0,156	0,098	19,4
Оконные откосы	Лин.2	1,25	0,11	0,138	22,2
Анкер	Точ. 1	10	0,004	0,04	13
				0,446	

$$A_{ст} = A_{\phi} - A_{ок}$$

$$A_{\phi} = 2700 * 21000 = 56,7 * 5 = 283,5 \text{ м}^2$$

$$OK2 = 15 \text{ шт } OK1 = 30 \text{ шт}$$

$$A_{ок1} = 1200 * 1350 = 1,62 * 30 = 48,6 \text{ м}^2$$

$$A_{ок2} = 1800 * 1350 = 2,43 * 15 = 36,45 \text{ м}^2$$

$$A_{ст} = 283,5 - 48,6 - 36,45 = 198,45 \text{ м}^2$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							9
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Площади и периметры оконных проемов

	P, м ²	N, шт	$\sum P, \text{м}^2$
OK1	5,1	30	153
OK2	6,3	15	94,5
			247,5

$$a_i = \frac{198,45}{198,45} = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^2}$$

$$l_{j1} = \frac{6 \cdot 21}{198,45} = 0,63 \frac{\text{м}}{\text{м}^2} \quad l_{j2} = \frac{247,5}{198,45} = 1,25 \frac{\text{м}}{\text{м}^2}$$

$$n_k = \frac{4}{0,78} \approx 5 \frac{\text{шт}}{\text{м}^2} \quad \text{Для двух слоёв } 10 \text{ шт/м}^2$$

$$U_i = \frac{1}{5,88} = 0,17 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$$

При $\lambda_0=0.52$ и $R_{\text{ут}}=4.76$

для $d_n=160$ $\Psi_{j1} = 0,156 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ [13, таблица Г.14]

для $d_p=80$ $\Psi_{j2} = 0,11 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ [13, таблица Г.32]

для $L_1=10$ $\chi_{k1} = 0,004 \frac{\text{Вт}}{\text{°C}}$ [13, таблица Г.32]

$$R_0^{\text{пр}} = \frac{1}{0,446} = 2,242 \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{°C})}{\text{Вт}}$$

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{пр}} * 0,63 = 2,21 \frac{(\text{м}^2 \cdot \text{°C})}{\text{Вт}}$$

$$R_0^{\text{пр}} \geq R_0^{\text{норм}}$$

Требования для данной ограждающей конструкции выполняются.

1.4 Проверка нормативных требований

По результатам расчета проводят оценку достижения целевого сопротивления теплопередаче и, при необходимости, корректируют конструктивное решение ограждающей конструкции. Корректировка может заключаться, как в изменении толщины или типа утеплителя, так и в замене наиболее значимых теплозащитных элементов. В нашем случае никаких изменений не требуется.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							10
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

2. Расчет сопротивления воздухопроницанию ограждающей конструкции.

Сопротивление воздухопроницанию ограждающих конструкций, за исключением заполнений световых проемов (окон, балконных дверей и фона-рей), зданий и сооружений R_u должно быть не менее нормируемого сопротивления воздухопроницанию $R_u^{тр}$, (м²·ч·Па)/кг, определяемого по формуле:

$$R_u^{тр} = \frac{\Delta p}{G_H} \quad (2.1)$$

где G_H – нормативная воздухопроницаемость ограждающих конструкций, кг/(м²·ч), принимаемая по [11, таблица 9] или приложению 5;
 Δp – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, Па, определяемая в формуле:

$$\Delta p = 0,55 \cdot H \cdot (\gamma_H - \gamma_B) + 0,03 \cdot \gamma_H \cdot V^2 \quad (2.2)$$

где H – высота здания (от уровня пола первого этажа до верха вытяжной шахты), м. Высота одного этажа принимается равной 3 м.

γ_H, γ_B – удельный вес соответственно наружного и внутреннего воздуха, Н/м³, определяемый по формуле:

$$\gamma = \frac{3463}{(273+t)} \quad (2.3)$$

где t – температура воздуха: внутреннего (для определения γ_B) - то же, что в формуле (1.5); наружного (для определения γ_H) - принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (то же, что в формуле (1.6));

V – максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, повторяемость которых составляет 16% и более, принимаемая по [12].

Сопротивление воздухопроницанию R_u многослойной ограждающей конструкции следует рассчитывать, как сумму сопротивлений воздухопроницанию отдельных слоев по формуле:

$$R_u = \sum_{i=1}^n R_{u,i} \quad (2.4)$$

где $R_{u,i}$ – сопротивления воздухопроницанию отдельных слоев ограждающей конструкции, (м²·ч·Па)/кг. Принимаются по [11, приложение С] или приложению 6.

В случае выполнения условия $R_u > R_u^{тр}$ выбранная ограждающая конструкция удовлетворяет нормативным требованиям.

В случае $R_u < R_u^{тр}$ необходимо предусмотреть меры по повышению сопротивления воздухопроницаемости ограждения. Для этого рекомендуется

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							11
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

выбрать отдельные материалы и конструкции с бóльшим R_u , а также располагать у наружной поверхности более плотные слои ограждения. В качестве таких слоев целесообразно принимать цементно-песчаную штукатурку, керамическую плитку, естественный облицовочный камень и т.п.

$$G_H = 0,5 \frac{\text{кг}}{(\text{м}^2 \cdot \text{ч})}$$

$$t_B = 20^\circ\text{C}$$

$$t_H = -35^\circ\text{C}$$

$$V = 3,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$H = 2,7 \text{ м}$$

$$\gamma_H = \frac{3463}{(273 + t_H)} = \frac{3463}{(273 - 35)} = 14,55 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$$

$$\gamma_B = \frac{3463}{(273 + t_B)} = \frac{3463}{(273 + 20)} = 11,82 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$$

$$\Delta p = 0,55 \cdot 2,7 \cdot 5(14,55 - 11,82) + 0,03 \cdot 14,55 \cdot 3^2 = 24,18 \text{ Па}$$

Подберем пропорцией сопротивление воздухопроницанию каждого слоя по приложению 6:

Для 1-го слоя: R_u для 10 мм – 373 ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/кг

Для 2-го слоя: R_u для 380 мм – 2 ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/кг

Для 3-го слоя: R_u для 350 мм – 8 ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/кг

Для 4-го слоя: R_u для 120 мм – 2 ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/кг

Значит:

$$R_u = \sum_{i=1}^n R_{u,i} = R_{u,1} + R_{u,2} + R_{u,3} + R_{u,4} = 373 + 2 + 8 = 385 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{кг}}$$

$$R_u^{\text{тр}} = 24,18 : 0,5 = 48,36$$

Получаем, что $R_u > R_u^{\text{тр}}$

Ограждающая конструкция удовлетворяет нормативным требованиям.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							12
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

3. Расчет стационарного температурного поля в ограждении.

При проектировании и выборе конструкций ограждения необходимо знать распределение температуры в его толще и на поверхности. Это дает возможность определить область промерзания ограждающей конструкции, условия конденсации влаги в толще конструкции, правильно назначить место расположения пароизоляционных слоев.

3.1. Расчет одномерного стационарного температурного поля.

3.1.1. Расчет без учета фильтрации воздуха.

При стационарном режиме теплопередачи через ограждения температура в любой плоскости x определяется по формуле:

$$t_x = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{R_{B-x}}{R_0} \quad (3.1)$$

где R_{B-x} – сопротивление теплопередаче от внутренней среды до сечения x ;
 R_0 – общее сопротивление теплопередаче однородной части ограждающей конструкции.

Для построения графика одномерного стационарного поля в ограждении достаточно определить на поверхностях ограждения и в плоскостях соприкосновения слоев из разного материала .

$$R_{B-1} = R_B = \frac{1}{\alpha_B} = 0,115 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$R_{B-2} = R_B + R_1 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 0,136 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$R_{B-3} = R_B + R_1 + R_2 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 0,867 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$R_{B-4} = R_B + R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = 5,627 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$R_{B-5} = R_B + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} = 5,834 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$R_0 = 5,88 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

$$t_B = 20^\circ\text{C}$$

$$t_H = -35^\circ\text{C}$$

$$t_1 = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{R_{B-1}}{R_0} = 20 - (20 - (-35)) \cdot \frac{0,115}{5,88} = 18,92^\circ\text{C}$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							13
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

$$t_2 = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{R_{B-2}}{R_0} = 20 - 9,354 \cdot 0,136 = 18,73 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{R_{B-3}}{R_0} = 20 - 9,354 \cdot 0,867 = 11,89 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_4 = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{R_{B-4}}{R_0} = 20 - 9,354 \cdot 5,627 = -32 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_5 = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{R_{B-5}}{R_0} = 20 - 9,354 \cdot 5,834 = -34,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

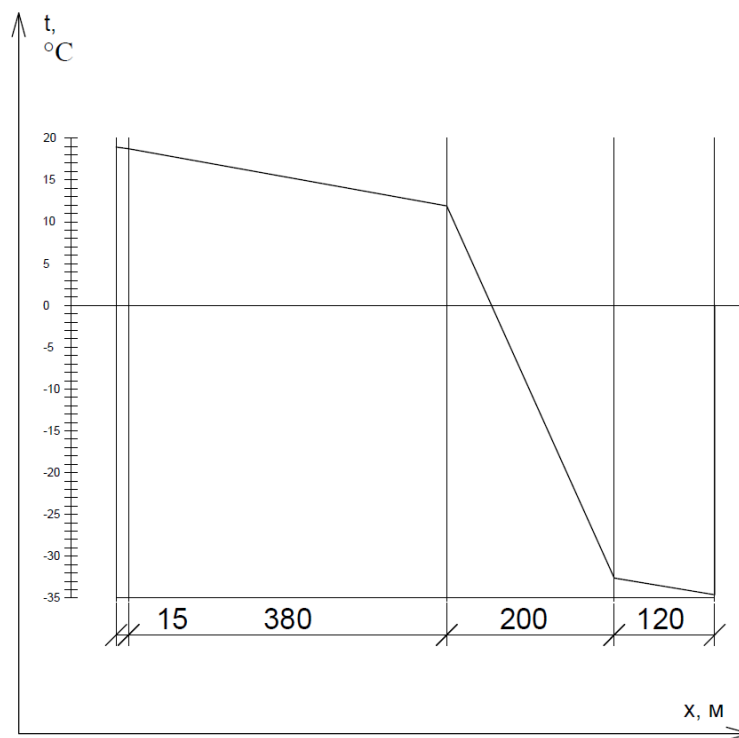


Рис. 1. График распределения температуры без учета фильтрации.

3.1.2. Расчет с учетом фильтрации воздуха.

При наличии поперечной фильтрации воздуха в ограждающей конструкции (рис. 2) температура в рассчитываемом сечении определяется по формулам:

при инфильтрации:

$$t_x^{\text{инф}} = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_{B-x}} - 1}{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_0} - 1} \cdot \frac{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_0}}{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_{B-x}}} \quad (3.3)$$

при эксфильтрации:

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							14
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

$$t_x^{\text{эксф}} = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_{B-x}} - 1}{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_0} - 1} \quad (3.4)$$

где $e = 2,718$ – основание натурального логарифма;

0,278 – переводной коэффициент;

c_B – теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

G – количество воздуха, проходящего через ограждение, кг/(м²·ч);

R_{B-x} – то же, что в формуле (3.1).

Рассмотрим случай, когда ограждающая конструкция подвержена воздействию повышенного перепада давления, вызванного, например, высотой здания, кратковременными порывами ветра и др. В рамках данной курсовой работы разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции рассчитывается укрупненно, а G определяется по формуле:

$$G = \frac{\Delta p}{R_u} = \frac{k \cdot \Delta p}{R_u} \quad (3.5)$$

где k – повышающий коэффициент ($k = 10$);

Δp – по формуле (2.2);

R_u – по формуле (2.4).

$$t_B = 20 \quad t_H = -35^\circ\text{C}$$

$$R_0 = 5,88 \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$$

$$c_B = 1,002 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta p = 24,18 \text{ Па}$$

$$R_u = 385 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}}{\text{кг}}$$

$$G = \frac{\Delta p}{R_u} = \frac{k \cdot \Delta p}{R_u} = \frac{10 \cdot 24,18}{385} = 0,628 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

$$t_1^{\text{инф}} = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_{B-1}} - 1}{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_0} - 1} \cdot \frac{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_0}}{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_{B-1}}} =$$

$$= 20 - (20 - (-35)) \cdot \frac{2,718^{0,278 \cdot 1,005 \cdot 0,628 \cdot 0,115} - 1}{2,718^{0,278 \cdot 1,005 \cdot 0,628 \cdot 5,88} - 1} \cdot \frac{2,718^{0,278 \cdot 1,005 \cdot 0,628 \cdot 5,88}}{2,718^{0,278 \cdot 1,005 \cdot 0,628 \cdot 0,115}}$$

$$= 18,32^\circ\text{C}$$

$$t_2^{\text{инф}} = 18,00^\circ\text{C}$$

$$t_3^{\text{инф}} = 7,95^\circ\text{C}$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							15
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

$$t_4^{\text{инф}} = -33,54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_5^{\text{инф}} = -34,68 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_1^{\text{эксф}} = t_B - (t_B - t_H) \cdot \frac{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_{B-1}} - 1}{e^{0,278 \cdot c_B \cdot G \cdot R_0} - 1} =$$

$$= 20 - (20 - (-2)) \cdot \frac{2,718^{0,278 \cdot 1,005 \cdot 0,628 \cdot 0,115} - 1}{2,718^{0,278 \cdot 1,005 \cdot 0,628 \cdot 5,88} - 1} = 19,39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2^{\text{эксф}} = 19,27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_3^{\text{эксф}} = 15,01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_4^{\text{эксф}} = -31,07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_5^{\text{эксф}} = -34,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

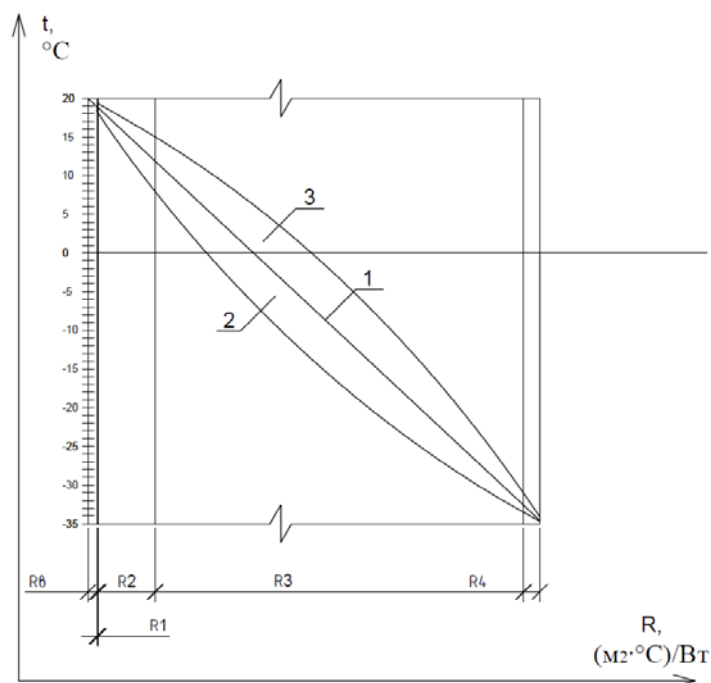


Рис. 2. График распределения температур в конструкции без учета(1) и с учетом воздухопроницаемости: при инфильтрации(2) и при эксфильтрации(3) воздуха.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							16
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

3.2. Расчет двумерного стационарного температурного поля.

Для решения ряда практических задач теплофизики зданий необходимо знать распределение температуры в толще ограждения и на его поверхностях. Температурное поле по своей геометрии может быть одно-, дву-, и трехмерным. Для расчета двумерных и трехмерных температурных полей необходимо использовать специализированное программное обеспечение. В рамках данной лабораторной работы предполагается использование расчетного комплекса ELCUT Студенческий, предназначенного для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач.

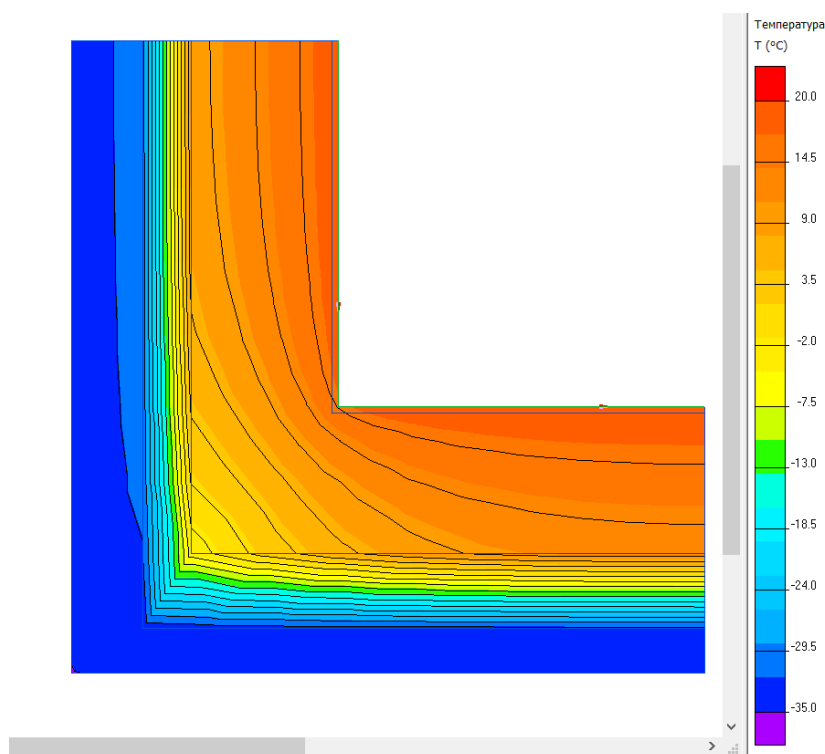


Рисунок 3. Двумерное стационарное температурное поле.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							17
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

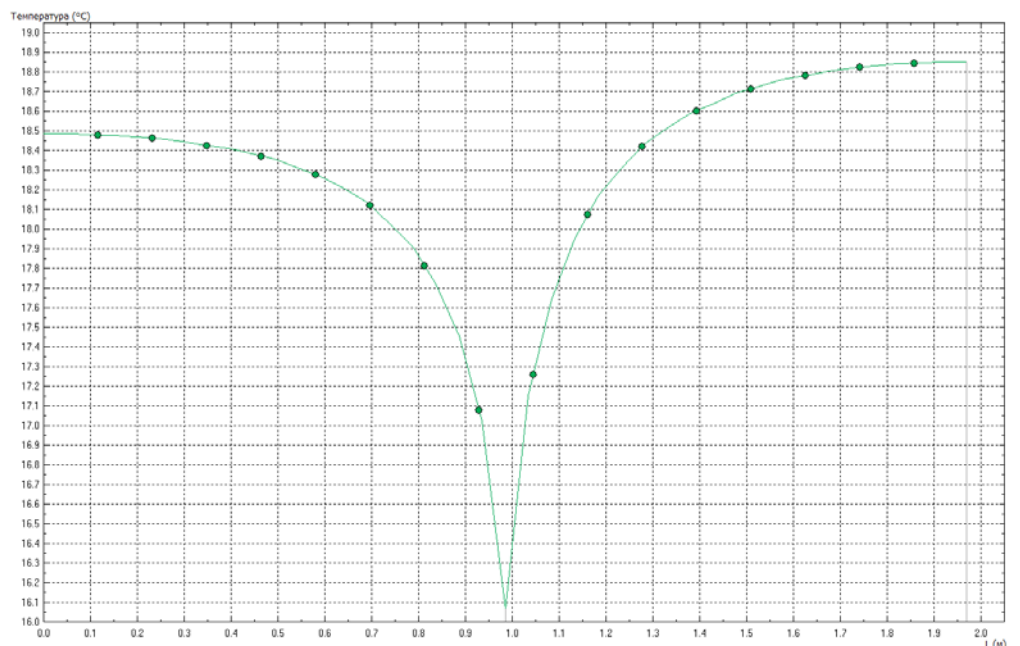


Рисунок 4. График распределения физических величин поля вдоль контура

4. Расчет теплоустойчивости.

Проверка наружных ограждений на теплоустойчивость осуществляется в районах со среднемесячной температурой воздуха в июле 21°C и выше. Теплоустойчивость – это свойство ограждения сохранять относительное постоянство температуры на внутренней поверхности τ_B при колебаниях внешних тепловых воздействий A_{t_H} и обеспечивать комфортные условия в помещении. Фактическая амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций не должна превышать требуемую:

$$A_{\tau_B} \leq A_{\tau_B}^{TP} \quad (4.1)$$

Требуемая амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций с учетом санитарно-гигиенических норм определяется по выражению:

$$A_{\tau_B}^{TP} = 2,5 - 0,1(t_H - 21) \quad (4.2)$$

где t_H – среднемесячная температура наружного воздуха за июль, °C, [12].

Фактическая амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности ограждения определяется по формуле:

$$A_{\tau_B} = \frac{A_{t_H}^{расч}}{\nu} \quad (4.3)$$

где $A_{t_n}^{\text{расч}}$ – расчетная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха, °С;

ν – величина затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха в ограждающей конструкции [7].

Расчетная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха равна:

$$A_{t_n}^{\text{расч}} = 0,5A_{t_n} + \frac{P(I_{\text{макс}} - I_{\text{ср}})}{\alpha_n} \quad (4.4)$$

где A_{t_n} – максимальная амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха в июле, °С, [12, таблица 11];

P – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности ограждающей конструкции [11, приложение II];

$I_{\text{макс}}, I_{\text{ср}}$ – соответственно максимальное и среднее значения суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной), Вт/м², принимаемые согласно [12] или по приложению 7 для наружных стен – как для вертикальных поверхностей западной ориентации и для покрытий – как для горизонтальной поверхности;

α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции по летним условиям, Вт/(м²·°С), определяемый по формуле:

$$\alpha_n = 5,8(1 + 2\sqrt{V}) \quad (4.5)$$

где V – минимальная скорость ветра из средних скоростей ветра по румбам за июль, повторяемость которых составляет 16 % и более, принимаемая согласно [12], но не менее 1 м/с.

Величина A_{t_n} зависит от свойств материала, характеризуемых значениями D , s , R , Y . Величину затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха ν в ограждающей конструкции, состоящей из однородных слоев, следует определять по формуле:

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_n)(s_1 + Y_1) \dots (s_n + Y_{n-1})(\alpha_n + Y_n)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_n + Y_n)\alpha_n} \quad (4.6)$$

где $e = 2,718$ – основание натурального логарифма;

D – тепловая инерция ограждающей конструкции, определяемая по формуле:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n R_i s_i \quad (4.7)$$

где R_i – термическое сопротивление отдельного i -го слоя ограждающей конструкции, м²·°С/Вт;

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							19
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

s_1, s_2, \dots, s_n – расчетные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С);

α_B – то же, что в формуле (1.6);

α_H – то же, что в формуле (4.4);

$Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n$ – коэффициенты теплоусвоения наружной поверхности отдельных слоев ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С).

Порядок нумерации слоев в формуле (4.6) принят в направлении от внутренней поверхности к наружной.

Для многослойной неоднородной ограждающей конструкции с теплопроводными включениями величину затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха v в ограждающей конструкции следует определять в соответствии с [8].

Примечания

Для определения коэффициентов теплоусвоения наружной поверхности отдельных слоев ограждающей конструкции следует предварительно вычислить тепловую инерцию D_i каждого слоя.

Коэффициент теплоусвоения наружной поверхности слоя Y , Вт/(м²·°С), с тепловой инерцией $D \geq 1$ следует принимать равным расчетному коэффициенту теплоусвоения s материала этого слоя конструкции.

Коэффициент теплоусвоения наружной поверхности слоя Y с тепловой инерцией $D < 1$ следует определять расчетом, начиная с первого слоя (считая от внутренней поверхности ограждающей конструкции) следующим образом:

а) для первого слоя – по формуле:

$$Y_1 = \frac{R_1 s_1^2 + \alpha_B}{1 + R_1 \alpha_B} \quad (4.8)$$

б) для i -го слоя – по формуле:

$$Y_i = \frac{R_i s_i^2 + Y_{i-1}}{1 + R_i Y_{i-1}} \quad (4.9)$$

Если условие (4.1) не выполняется, то ограждающая конструкция является нетеплоустойчивой. В этом случае необходимо принять для наружных слоев (ближе к наружному воздуху) материал с большим коэффициентом теплоусвоения s .

$$t_H = 29^\circ\text{C}$$

$$A_{\tau_B}^{\text{TP}} = 2,5 - 0,1(29 - 21) = 1,7^\circ\text{C}$$

$$V = 2,3 \text{ м/с} \quad P = 0,7$$

$$A_{t_H} = 22,1^\circ\text{C}$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							20
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

$$I_{\text{макс}} = 781 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad I_{\text{ср}} = 194 \text{ Вт/м}^2$$

$$\alpha_{\text{H}} = 5,8(1 + 2\sqrt{V}) = 5,8(1 + 2\sqrt{2,3}) = 23,39 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$A_{t_{\text{H}}}^{\text{расч}} = 0,5A_{t_{\text{H}}} + \frac{P(I_{\text{макс}} - I_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{H}}} = 0,5 \cdot 21 + \frac{0,7(781 - 194)}{23,39} 28,62^{\circ}\text{C}$$

Таблица 8

	s, Вт/(м ² · °C)	R, (м ² · °C)/Вт	D=Rs	Y, Вт/(м ² · °C)
1	8,95	0,021	0,188	8,78
2	7,01	0,731	5,124	7,01
3	0,46	4,762	2,19	0,46
4	8,08	0,207	1,1673	8,08
			9,175	

$$Y_1 = \frac{R_1 s_1^2 + \alpha_{\text{B}}}{1 + R_1 \alpha_{\text{B}}} = \frac{0,021 \cdot 8,95^2 + 8,7}{1 + 0,021 \cdot 8,7} = 8,78 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_{\text{B}})(s_2 + Y_1)(s_3 + Y_2)(s_4 + Y_3)(\alpha_{\text{H}} + Y_4)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2)(s_3 + Y_3)(s_4 + Y_4)\alpha_{\text{H}}} = 3828,6$$

$$A_{\tau_{\text{B}}} = \frac{A_{t_{\text{H}}}^{\text{расч}}}{\nu} = \frac{28,62}{3828,6} = 0,0075^{\circ}\text{C}$$

После решения получаем:

$$A_{\tau_{\text{B}}} < A_{\tau_{\text{B}}}^{\text{тр}}$$

Значит, условие выполняется, и ограждающая конструкция удовлетворяет требованиям теплоустойчивости.

5. Расчет влажностного режима.

5.1. Определение температуры точки росы.

Температура точки росы t_p для данного состояния внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$ определяется по формуле [7] или по приложению 8:

$$t_p = -\frac{5330}{\ln \frac{e_{\text{в}}}{1,84 \cdot 10^{11}}} - 273 \quad (5.1)$$

где $e_{\text{в}}$ – парциальное давление (действительная упругость) водяных паров воздуха в помещении, Па. Определяется по формуле:

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							21
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

$$e_B = \frac{\varphi_B * E_B}{100} \quad (5.2)$$

где φ_B – относительная влажность воздуха в помещении, %, для жилых помещений принимается 55 %; E_B – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре воздуха в помещении. В зависимости от точности может определяться по аппроксимационным формулам [4]. В частности, при температуре от минус 40 до плюс 45°С E находится по приложению 8 или формуле:

$$E = 1,84 * 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273+t}\right) \quad (5.3)$$

Найдем точку росы используя наши данные:

$$E = 1,84 * 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + 20}\right) = 2314,8 \text{ Па}$$

$$e_B = \frac{55 * 2314,8}{100} = 1273,1 \text{ Па}$$

$$t_p = -\frac{5330}{\ln \frac{1273,1}{1,84 * 10^{11}}} - 273 = 10,68 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.2. Проверка внутренней поверхности наружных ограждений на возможность конденсации влаги в зоне теплопроводного включения.

Конденсация влаги из внутреннего воздуха на внутренней поверхности наружного ограждения, особенно при резких понижениях температур, является основной причиной увлажнения наружных ограждений. Для устранения такой конденсации влаги необходимо добиваться, чтобы температура на внутренней поверхности $t_{вп}$ и в толще ограждения превышала температуру точки росы t_p на $2 \div 3$ °С, т.е. должно соблюдаться условие $t_{вп} > t_p + (2 \div 3)^\circ\text{C}$.

Расчет

1) Определяется температура внутренней поверхности $t_{вп}$ для однородной конструкции (см. раздел 3.1.1):

$$t_{вп} = t_B - (t_B - t_H) * \frac{R_B}{R_0} \quad (5.4)$$

2) Температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции в зоне теплотехнической неоднородности $t_{вп}$ неод определяется по результатам расчета двумерного температурного поля с использованием специального программного обеспечения [15]. Расчет выполняется в рамках раздела 3.2.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							22
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

- 3) Температура точки росы t_p для данного состояния внутреннего воздуха $t_{в}$.
- 4) Выполняется проверка санитарно-гигиенического требования к ограждающей конструкции, для чего сравниваются $t_{вп}$ и $t_{впнеод}$ с t_p .

В случае, когда $t_{вп} > t_p$ и $t_{впнеод} > t_p$, то конденсации на внутренней поверхности ограждения не будет. Санитарно-гигиеническое требование выполняется. Если же $t_{вп} < t_p$ или $t_{впнеод} < t_p$, то возможно выпадение конденсата. В случае, когда $t_{вп} < t_p$, необходимо увеличение общего сопротивление теплопередаче однородной части (глади) ограждающей конструкции R_0 .

При $t_{впнеод} < t_p$ как правило требуется модернизация рассматриваемого конструктивного узла. Для снижения температуры точки росы должна быть предусмотрена вентиляция помещения с целью регулирования влажности внутреннего воздуха.

Выполняем расчет с нашими данными:

$$t_{вп} = 20 - (20 - (-35)) * \frac{0,115}{5,88} = 18,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{вп}^{неод} = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_p = 10,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Условия $t_{вп} > t_p$ и $t_{вп}^{неод} > t_p$ выполняются, следовательно конденсации на внутренней поверхности ограждения не будет. Санитарно-гигиеническое требование выполняется.

5.3. Проверка нормативных требований по защите от переувлажнения ограждающих конструкций.

При разности парциальных давлений водяных паров внутреннего и наружного воздуха в толще ограждения возникает поток водяного пара (диффузия), который направлен в сторону меньшего давления. Свойства материалов пропускать водяные пары называется паропроницаемостью.

Защита от переувлажнения ограждающих конструкций должна обеспечиваться путем проектирования ограждающих конструкций с сопротивлением паропроницанию внутренних слоев не менее требуемого значения, определяемого расчетом одномерного влагопереноса (осуществляемому по механизму паропроницаемости).

Сопротивление паропроницанию $R_{п}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$, ограждающей конструкции (в пределах от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения (ПМУ)) должно быть не менее наибольшего из следующих требуемых сопротивлений паропроницанию:

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							23
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

а) требуемого сопротивления паропрооницанию $R_{п1}^{тр}$, (м²·ч·Па)/мг (из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации), определяемого по формуле:

$$R_{п1}^{тр} = \frac{(e_B - E)R_{пн}}{E - e_H} \quad (5.5)$$

б) требуемого сопротивления паропрооницанию $R_{п2}^{тр}$ (м²·ч·Па)/мг (из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха), определяемого по формуле:

$$R_{п2}^{тр} = \frac{0,0024 \cdot z_0 \cdot (e_B - E_0)}{\rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta W_{cp} + \eta} \quad (5.6)$$

где e_B – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетных температуре и относительной влажности воздуха в помещении, определяемое по формуле:

$$e_B = \frac{\varphi_B \cdot E_B}{100} \quad (5.7)$$

где E_B – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре внутреннего воздуха помещения t_B , определяемое в соответствии с приложением 8.

φ_B – относительная влажность внутреннего воздуха, % ($\varphi_B = 55\%$);

E – парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения за годовой период эксплуатации, Па, определяемое по формуле:

$$E = \frac{E_1 z_1 + E_2 z_2 + E_3 z_3}{12} \quad (5.8)$$

где E_1, E_2, E_3 – парциальные давления насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения, соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов, Па, определяемые согласно приложению 8, по температуре в плоскости максимального увлажнения, при средней температуре наружного воздуха соответствующего периода;

z_1, z_2, z_3 – продолжительность зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов года, мес, определяемая по [12] с учетом следующих условий:

а) к зимнему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха ниже минус 5 °С;

б) к весенне-осеннему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха от минус 5 до 5 °С;

в) к летнему периоду относятся месяцы со средними температурами воздуха выше плюс 5 °С;

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							24
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Примечание:

$R_{\text{пн}}$ – сопротивление паропроницанию, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$, части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и плоскостью максимального увлажнения.

$e_{\text{н}}$ – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период, Па [12];

z_0 – продолжительность периода влагонакопления, сут, принимаемая равной периоду с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха [12];

E_0 – парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения, Па, определяемое при средней температуре наружного воздуха периода влагонакопления z_0 ;

ρ_{w} – плотность материала увлажняемого слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$;

δ_{w} – толщина увлажняемого слоя ограждающей конструкции, м, принимаемая равной $2/3$ толщины однородной (однослойной) стены или толщине слоя многослойной ограждающей конструкции, в котором располагается плоскость максимального увлажнения;

ΔW – предельно допустимое приращение влажности в материале увлажняемого слоя, % по массе, за период влагонакопления z_0 , принимаемое по [11, таблица 10].

В случае, когда плоскость максимального увлажнения приходится на стык между двумя слоями, $\rho_{\text{w}} \cdot \delta_{\text{w}} \cdot \Delta W$ в формуле (5.2) принимается равной сумме $(\rho_{\text{w}_1} \delta_{\text{w}_1} \Delta W_1 + \rho_{\text{w}_2} \delta_{\text{w}_2} \Delta W_2)$, где δ_{w_1} и δ_{w_2} соответствуют половинам толщин стыкующихся слоев.

η – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\eta = \frac{0,0024(E_0 - e_{\text{н.отр}})z_0}{R_{\text{пн}}} \quad (5.9)$$

где $e_{\text{н.отр}}$ – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, Па [12].

Плоскость максимального увлажнения:

$$f_i(t_{\text{м.у.}}) = 5330 \frac{R_{\text{о.п}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н.отр}})}{R_{\text{о}}^{\text{всл}}(e_{\text{в}} - e_{\text{н.отр}})} \cdot \frac{\mu_i}{\lambda_i} \quad (5.10)$$

где $R_{\text{о.п}}$ – общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							25
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

R_o^{ysl} – условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции, (м²·°C)/Вт,

$t_{н.отр}$ – средняя температура наружного воздуха для периода с отрицательными среднемесячными температурами, °C;

λ_i, μ_i – расчетные коэффициенты теплопроводности, Вт/(м²·°C), и паропроницаемости, мг/(м·ч·Па), материала соответствующего слоя.

Таблица 9

Определение плоскости максимального увлажнения

№ слоя	fi(тм.у.)	тм.у.	tx	Наличие ПМУ
			19.39	
1	14,11	29	19.28	-
2	31,02	22,1	15.38	-
3	1200,24	-34,1	-9.95	-
4	26,07	24,4	-11.05	-

ПМУ согласно примечанию между 3 и 4 слоем

$$f_1 = 5330 \frac{3,728 \cdot (20 + 11,3)}{4,4 \cdot (1273,14 - 224)} \cdot \frac{0,098}{0,7} = 14,11$$

$$f_2 = 31,02$$

$$f_3 = 1200,24$$

$$f_4 = 26,07$$

$$t_x = t_B - (t_B - t_H) * \frac{R_{B-x}}{R_o}$$

$$t_1 = 20 - \frac{20 + 11,3}{5,88} * 0,115 = 19,39^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 19,28^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 15,38^\circ\text{C}$$

$$t_4 = -9,95^\circ\text{C}$$

$$t_5 = -11,05^\circ\text{C}$$

Таблица 10

Температура и парциальное давление водяного пара по месяцам

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							26
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Месяцы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Время года	Зима			Весна	Лето				Осень	Зима		
е, Па	150	160	270	500	740	1160	1500	1300	920	530	330	210
t, °C	-16,2	-14,3	-5,7	3,7	11,0	16,5	18,6	15,4	9,6	2,2	-6,8	-13,5

Средние температуры наружного воздуха месячных периодов:

$$t_{\text{н}}^{\text{зимн.}} = -11,3$$

$$t_{\text{н}}^{\text{вес.-осен.}} = 2,95 \text{ °C}$$

$$t_{\text{н}}^{\text{летн.}} = 14,22 \text{ °C}$$

По этим температурам определяются температуры в плоскости возможной конденсации:

$$t_{\text{х}}^{\text{зимн.}} = 20 - \frac{20 + 11,3}{5,88} \cdot 5,834 = -11,06 \text{ °C}$$

$$t_{\text{х}}^{\text{вес.-осен.}} = 3,08 \text{ °C}$$

$$t_{\text{х}}^{\text{летн.}} = 14,27 \text{ °C}$$

И по этим температурам по приложению 8 определяются E:

$$E1 = 234 \text{ Па}$$

$$E2 = 802 \text{ Па}$$

$$E3 = 1618 \text{ Па}$$

$$E = \frac{234 \cdot 5 + 802 \cdot 2 + 1618 \cdot 5}{12} = 905,33 \text{ Па}$$

$e_{\text{н}}$ – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период, Па;

$$e_{\text{н}} = 647,5 \text{ Па}$$

$R_{\text{п.н}}$ – сопротивление паропроницанию, , части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и плоскостью максимального увлажнения:

$$R_{\text{пн}} = \frac{\delta_4}{\mu_4} = 0,8 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$$

$$R_{\text{н1}}^{\text{тр}} = \frac{(1273,1 - 905,33) \cdot 0,8}{905,33 - 647,5} = 1,14 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							27
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

б) требуемого сопротивления паропроницанию (из условия ограничения

$$t_o(z_o) = -10,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$E_o = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + (-10,9)}\right) = 270,48 \text{ Па}$$

$$\rho_w = 1600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\delta_w = 0,12 \text{ м}$$

$$\Delta w = 1,5 \text{ \%}$$

$$e_{\text{н.отриц.}} = 224 \text{ Па}$$

$$\eta = \frac{(0,0024 \cdot (E_o - e_{\text{н.отриц.}}) \cdot z_o)}{R_{\text{п.н.}}} = 22,73$$

$$R_{\text{п2}}^{\text{тр}} = \frac{0,0024 \cdot 163 \cdot (1273,1 - 270,48)}{1600 \cdot 0,12 \cdot 1,5 + 22,73} = 1,26 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг}$$

$$R_{\text{п}} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} = 2,9728 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг}$$

$$R_{\text{п}} > R_{\text{п1}}^{\text{тр}}, R_{\text{п2}}^{\text{тр}}$$

Условие выполняется.

5.4. Расчет конденсации влаги в толще ограждения.

Расчет влажностного режима ограждения при стационарных условиях диффузии водяного пара производится графическим методом для периодов с отрицательными и положительными температурами наружного воздуха.

Для выяснения вопроса, будет ли происходить в ограждении конденсация влаги или нет, необходимо построить линию падения упругости водяного пара e и линию падения максимальной упругости водяного пара E от сопротивления паропроницанию Rn (рис. 7).

$$R_{\text{п.о}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_4}{\mu_4} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,098} + \frac{0,38}{0,16} + \frac{0,2}{0,5} + \frac{0,12}{0,15} + \frac{1}{23} = 3,886 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг}$$

Значение $e_{\text{н}}$ принимается по [12, таблица 7.1] как среднее за соответствующий период года. Упругость водяного пара в любом сечении ограждения e_x находится по формуле:

$$e_x = e_{\text{в}} - (e_{\text{в}} - e_{\text{н}}) \cdot \frac{R_{\text{пв-x}}}{R_{\text{п.о}}}$$

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							28
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Таблица 11

Парциальные давления водяного пара и температуры в холодный и теплый периоды

	$e_v, \text{Па}$	$e_n, \text{Па}$	$t_v, ^\circ\text{C}$	t_1	t_2	t_3	$t_{н.ср}$
Холодный	1273	224	19,39	19,28	15,38	-9,9	-11,05
Теплый		950	19,82	19,79	18,7	11,39	11,07

Таблица 12

Парциальные давления насыщенного водяного пара в холодный и теплый периоды

	E_v	E_1	E_2	E_3	E_n
Холодный	2229	2213,4	1729,6	292,8	268
Теплый	2289	2284,8	2134,5	1334,5	1306,6

Используя данные в таблицах построим графики:

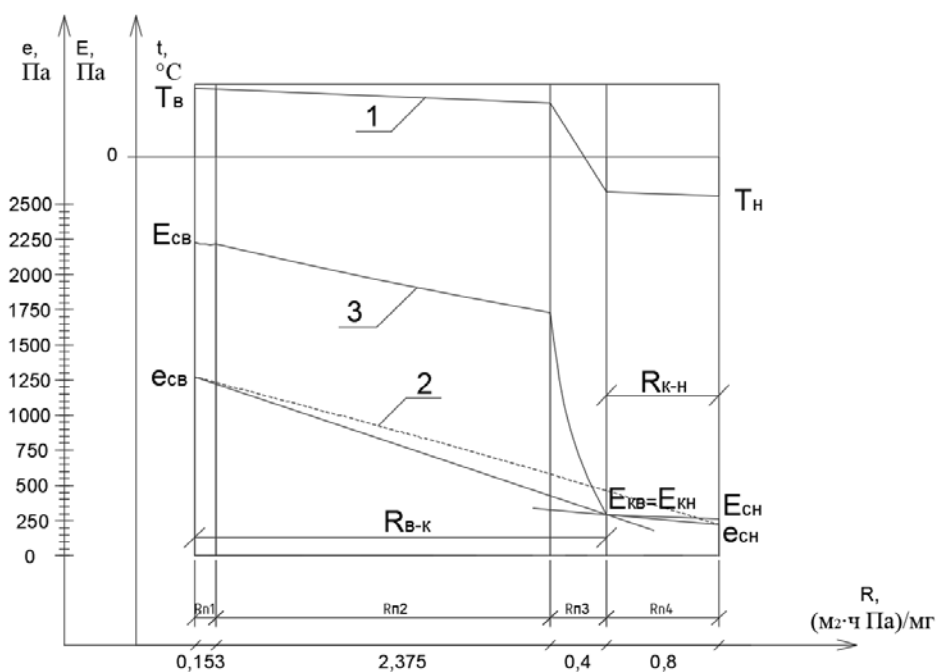


Рисунок 5. Графики изменения $\tau(x)$ – (1), $e(R_n)$ – (2), $E(R_n)$ – (3) ограждающей конструкции в холодный период

Так как мы имеем зоны конденсации необходимо определить количество влаги, конденсирующейся в ограждении при стационарных условиях диффузии водяного пара. Количество пара (массовый поток), поступающего к зоне конденсации из помещения, вычисляется по формуле:

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							29
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

$$j_{m1} = \frac{e_{св} - E_{KB}}{\sum_{i=1}^k R_{B-K}} \quad (5.13)$$

где $\sum R_{B-K}$ - сопротивление паропрооницанию от внутренней поверхности до левой границы зоны конденсации, $(м^2 \cdot ч \cdot Па)/мг$.

$$j_{m1} = \frac{1273 - 292,8}{2,928} = 334,8 \frac{мг}{м^2 \cdot ч}$$

Количество пара, уходящего из зоны конденсации наружу, вычисляется по формуле:

$$j_{m2} = \frac{|E_{KH} - e_{CH}|}{R_{PH}}, \left[\frac{мг}{м^2 \cdot ч} \right] \quad (5.14)$$

где $\sum R_{K-H}$ - сопротивление паропрооницанию от правой границы зоны конденсации (E_{KH}) - до наружной поверхности.

$$j_{m2} = \frac{292,8 - 224}{0,8} = 86 \frac{мг}{м^2 \cdot ч}$$

Так как $E_{CH} > e_{CH}$, то

$$j_k = 334,8 - 86 = 248,8 \frac{мг}{м^2 \cdot ч}$$

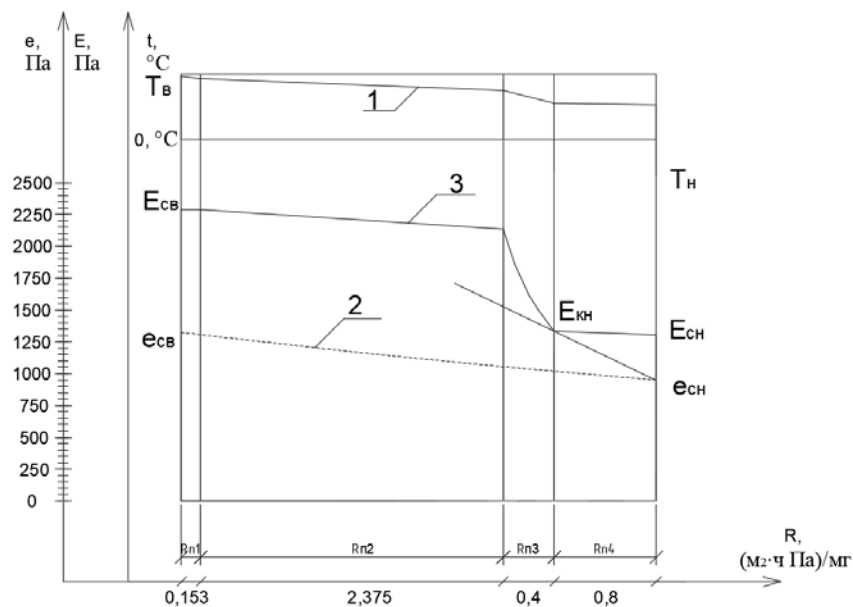


Рисунок 6. Графики изменения $\tau(x)$ – (1), $e(R_n)$ – (2), $E(R_n)$ – (3) ограждающей конструкции в теплый период

Рассмотренный метод расчета влажностного режима ограждения позволяет рассчитать также скорость просыхания (сушки) ограждения после

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист 30
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

прекращения в нем конденсации пара в период с положительными температурами наружного воздуха. Упругость водяного пара в этом случае принимается равной значению E_k при соответствующей средней температуре теплого периода года.

Величины j_{m1} и j_{m2} для периода просыхания определяются по формулам (5.13) и (5.14) и означают соответственно удельное количество влаги, удаляемой в сторону помещения и по направлению к наружной поверхности

$$j_{m1} = \frac{1334,5 - 1273}{2,928} = 21 \frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

$$j_{m1} = \frac{1306,6 - 950}{0,8} = 445,75 \frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

$$j_{\text{выс}} = 466,75 \frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

$$\frac{j_k}{j_{\text{выс}}} = 0,53 < 1$$

Значит годовой баланс влаги в ограждении будет нормальным.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							31
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Заключение

Мы рассмотрели вопросы теплопередачи, воздухопроницания и влажностного режима ограждений в связи с процессами тепло- и массообмена, обусловленными действием внешних климатических факторов и работой систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха.

С помощью расчетов мы установили, что наша конструкция полностью соответствует предъявляемым требованиям при снижении m_p (коэффициента, учитывающего особенности региона строительства) до 0,63.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							32
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		

Список литературы

1. В.Н. Богословский. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) – 3-е изд. С-Пб.: Издательство «АВОК Северо-Запад», 2006. – 400 с., ил.
2. В.Н. Богословский. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. – 248 с., ил.
3. В.М. Ильинский. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий): Уч. пособие для инж.-строит. вузов. М.: Высш. школа, 1974. – 320 с., ил.
4. Р.А. Садыков. Процессы переноса при кратковременном контакте фаз. Казань: Казан.гос.энерг.ун-т, 2004. – 176 с., ил.
5. Р.А. Садыков. Тепломассоперенос в процессах вакуумной сушки и аппаратурное оформление технологии сушки лабильных биопрепаратов: диссертация д.техн.наук. Казань: 1990, 517 с.
6. Ф.В. Ушков. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. М.: Стройиздат, 1969. – 144 с., ил.
7. К.Ф. Фокин. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: изд. АВОК-ПРЕСС, 2006. – 251 с.
8. ГОСТ 26253-2014 Здания и сооружения. Метод определения теплоустойчивости ограждающих конструкций.
9. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
10. ГОСТ 31167-2009 Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях.
11. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
12. СП 131.13330.2012 Строительная климатология.
13. СП 230.1325800.2015 Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей.
14. В. Блази. Справочник проектировщика. Строительная физика. (пер. с нем. под ред. и с доп. А.К. Соловьева). М.: Техносфера, 2005. – 480 с.
15. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. СПб.: ПК ТОР, 2009. – 339 с.

						ИСТИЭС КР 19 23	Лист
							33
Изм.	Кол.уч	Лист	№ докум	Подп.	Дата		