

Лабораторная работа №1

Определение влажностного режима наружной стены графическим методом

Цель работы: Целью лабораторной работы является выявление возможности конденсации водяного пара в ограждении путем определения влажностного режима наружной стены графическим методом.

Последовательность выполнения работы:

1. Определить по СП 131.13330.2018 расчетные параметры наиболее холодного месяца.
2. Рассчитать температуры внутри и на поверхностях ограждения и построить линию падения температуры (линия τ).
3. Рассчитать значения максимальной упругости водяного пара в ограждении и на его поверхностях и построить линию падения E .
4. Рассчитать значения действительной упругости водяного пара в ограждении и на его поверхностях и построить линию падения e .
5. Сопоставить сходжение линии E и e на предмет возможного пересечения и сделать выводы о влажностном режиме наружной стены.

Задача

Рассчитать влажностный режим наружной стены из туфобетона $\rho=1400\text{кг/м}^3$ толщиной 50 см в н.п. Петрозаводск (Республика Карелия) в наиболее холодный месяц при $t_v=18^\circ\text{C}$, $\phi_v=55\%$.

Решение

Найдем параметры наиболее холодного месяца. В соответствии с таблицей 5.1 СП 131.13330.2018 для Петрозаводска самый холодный месяц – январь и $t_n=-10,3^\circ\text{C}$.

Таблица 5.1 СП 131.13330.2018

Республика, край, область, пункт, административный округ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Кемь*	-10,9	-10,5	-5,5	-0,7	4,9	10,9	14,3	12,9	8,5	2,5	-3,2	-7,6	1,3
Лоухи	-12,1	-12,4	-8,3	-1,7	4,7	11,6	14,8	12,8	7,2	1,0	-4,4	-8,5	0,4
Олонец	-10,3	-10,5	-6,3	1,3	8,6	13,6	16,4	14,7	9,3	3,4	-1,8	-7,1	2,6
Паданы*	-11,2	-10,7	-5,2	0,2	6,5	12,7	16,0	14,0	8,8	2,8	-3,0	-7,8	1,9
Петрозаводск*	-10,3	-9,5	-3,8	1,8	8,4	13,7	16,5	14,3	9,1	3,3	-2,5	-7,0	2,8
Реболы*	-11,9	-11,5	-5,7	0,0	6,9	13,3	16,1	13,5	8,0	1,9	-4,0	-8,8	1,5
Сортавала*	-9,1	-8,9	-3,8	2,0	8,6	14,0	16,9	15,0	9,6	4,2	-1,1	-5,8	3,5

Согласно таблице 3.1 СП 131.13330.2018 для Петрозаводска средняя месячная относительная влажность января $\phi_n=86\%$.

Таблица 3.1 СП 131.13330.2018

Республика, край, область, пункт, административный округ	Температура воздуха наиболее холодных суток, °С, обеспеченностью		Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С, обеспеченностью		Температура воздуха, °С, обеспеченностью 0,94	Абсолютная минимальная температура воздуха, °С	Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца, °С	Продолжительность, сут. и средняя температура воздуха, °С, периода со средней суточной температурой воздуха						Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца, %	Средняя месячная относительная влажность воздуха в 15 ч наиболее холодного месяца, %	Количество осадков за ноябрь – март, мм	Преобладающее направление ветра за декабрь – февраль	Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, м/с	Средняя скорость ветра, м/с, за период со средней суточной температурой воздуха ≤ 8 °С
	0,98	0,92	0,98	0,92				≤ 0 °С	≤ 8 °С	≤ 10 °С									
								продолжительность	средняя температура	продолжительность	средняя температура	продолжительность	средняя температура						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Лоухи	-38	-36	-34	-31	-17	-47	8,7	184	-7,6	261	-4,2	281	-3,2	86	86	159	ЮЗ	—	3,1
Олонец	-38	-35	-34	-29	-15	-54	8,4	156	-6,7	233	-3,2	255	-2,1	86	86	215	ЮЗ	6,5	4,2
Паданы*	-35	-34	-32	-30	-14	-46	7,1	170	-7,1	246	-3,7	266	-2,7	85	85	142	З	4,0	3,6
Петрозаводск*	-35	-33	-31	-28	-14	-43	6,4	158	-6,6	235	-3,2	256	-2,2	86	84	169	З	4,2	3,2
Репозы*	-40	-37	-35	-33	-15	-42	7,6	175	-7,6	248	-4,2	267	-3,3	85	84	184	ЮЗ	3,1	2,5
Сортавала*	-36	-32	-31	-29	-14	-43	7,5	151	-6	232	-2,5	253	-1,6	85	—	217	Ю	4,3	2,8

Для построения линии падения температуры разобьем наружную стену на произвольное количество равных по толщине слоев (в нашем случае пять слоев толщиной по 10 см как на рисунке 1). Температура на границе произвольного слоя t_x определяется по формуле 8.10 СП 50.13330.2012

$$t_x = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_0^{усл}} R_x$$

где R_x - сопротивление теплопередаче части ограждающей конструкции от внутренней поверхности до плоскости, отстоящей от внутренней поверхности на расстоянии x , $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$.

Условное сопротивление теплопередаче стены определяется по формуле Е6 СП 50.13330.2012:

$$R_0^{усл} = \frac{1}{\alpha_в} + \sum \frac{\delta_{si}}{\lambda_{si}} + \frac{1}{\alpha_н}$$

В нашем случае наружная стена состоит из одного слоя в виде легкого бетона $\gamma = 1400 \text{ кг/м}^3$ толщиной 500 мм. То есть формула Е.6 СП 50.13330.2012 примет вид

$$R_0^{усл} = \frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_н}$$

Итак, для наружной стены согласно таблице 4 СП 50.13330.2012 $\alpha_в$ будет равно $8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ C)$.

Таблица 4 СП 50.13330.2012 - Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции

Внутренняя поверхность ограждения	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{в}$, Вт/(м ² ·°С)
1. Стен , полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты h ребер к расстоянию a между гранями соседних ребер $h/a \leq 0,3$	8,7
2. Потолков с выступающими ребрами при отношении $h/a > 0,3$	7,6
3. Окон	8,0
4. Зенитных фонарей	9,9

Согласно таблице 6 СП 50.13330.2012 α_n будет равно 23 Вт/(м²·°С)

Таблица 6 СП 50.13330.2012 - Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции

№ п.п.	Наружная поверхность ограждающих конструкций	Коэффициент теплоотдачи α_n , Вт/(м ² ·°С)
1	Наружных стен , покрытий, перекрытий над проездами и над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в Северной строительной-климатической зоне	23
2	Перекрытий над холодными подвалами, сообщающимися с наружным воздухом, перекрытий над холодными (с ограждающими стенками) подпольями и холодными этажами в Северной строительной-климатической зоне	17
3	Перекрытий чердачных и над неотапливаемыми подвалами со световыми проемами в стенах, а также наружных стен с воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом	12
4	Перекрытий над неотапливаемыми подвалами и техническими, подпольями, не вентилируемых наружным воздухом	6

Значение коэффициента теплопроводности материала слоя λ для конкретных условий эксплуатации принимаются по Приложению Т СП 50.13330.2012. Но прежде следует установить условия эксплуатации.

Условия эксплуатации принимаем по п.4.4 СП 50.13330.2012. Для этого следует выявить зону влажности и влажностный режим помещений и далее воспользоваться таблицей 2 СП 50.13330.2012.

Примем в текущем примере влажностный режим помещений **«Нормальный»**. Зону влажности определим по приложению В СП 50.13330.2012

Город Петрозаводск находится во 2-й, т.е. «*нормальной*» зоне влажности. Таким образом, условия эксплуатации **Б**.

Таблица 2 СП 50.13330.2012 — Условия эксплуатации ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений зданий (по таблице 1)	Условия эксплуатации А и Б в зоне влажности (по приложению В)		
	сухой	нормальной	влажной
Сухой	А	А	Б
Нормальный	А	Б	Б
Влажный или мокрый	Б	Б	Б

Согласно приложения Т СП 50.13330.2012 коэффициент теплопроводности λ туфобетона плотностью $\gamma_{кл} = 1400 \text{ кг/м}^3$ (поз. 93 таблицы) для условий эксплуатации Б составит $\lambda = 0,58 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$.

Тогда условное сопротивление теплопередаче стены составляет:

$$R_0^{усл} = \frac{1}{\alpha_в} + \frac{\delta_{si}}{\lambda_{si}} + \frac{1}{\alpha_н} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,5}{0,58} + \frac{1}{23} = 1,02 (\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{С}) / \text{Вт}$$

Рассчитаем распределение температуры в стеновом ограждении и построим температурную линию. Для удобства сведем все данные в таблицу 1. Температура на внутренней поверхности ограждения $\tau_в = \tau_1$ определится как

$$\tau_1 = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0} \cdot R_в = 18 - \frac{18 - (-10,2)}{1,02} \cdot 0,115 = 14,8^\circ\text{С}$$

Температуры на границах слоев t_x определяется по формуле 8.10 СП 50.13330.2012

$$t_x = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0^{усл}} R_x$$

где $R_x = R_в + \sum_{n=1} R$

На границе 1-го и 2-го слоев R_x будет определяться как сумма термического сопротивления тепловосприятию $R_в$ и термического сопротивления 1-го слоя из туфобетона толщиной 10 см

$$\tau_2 = t_в - \frac{t_в - t_н}{R_0} \cdot \left(R_в + \sum_{n=1} R \right) = 18 - \frac{18 + 10,3}{1,02} \cdot \left(0,115 + \frac{0,1}{0,58} \right) = 10,0^\circ\text{С}$$

На границе 2-го и 3-го слоев R_x будет определяться как сумма термического сопротивления тепловосприятию $R_в$ и термического сопротивления 1-го и 2-го слоев из туфобетона общей толщиной 20 см

$$\tau_3 = t_e - \frac{t_e - t_n}{R_0} \cdot \left(R_e + \sum_{n-1} R \right) = 18 - \frac{18 + 10,3}{1,02} \cdot \left(0,115 + \frac{0,2}{0,58} \right) = 5,3^{\circ}C$$

На границе 3-го и 4-го слоев R_x будет определяться как сумма термического сопротивления тепловосприятию R_e и термического сопротивления 1-го, 2-го и 3-го слоев из туфобетона общей толщиной 30 см

$$\tau_4 = t_e - \frac{t_e - t_n}{R_0} \cdot \left(R_e + \sum_{n-1} R \right) = 18 - \frac{18 + 10,3}{1,02} \cdot \left(0,115 + \frac{0,3}{0,58} \right) = 0,5^{\circ}C$$

На границе 4-го и 5-го слоев R_x будет определяться как сумма термического сопротивления тепловосприятию R_e и термического сопротивления 1-го, 2-го, 3-го и 4-го слоев из туфобетона общей толщиной 40 см

$$\tau_5 = t_e - \frac{t_e - t_n}{R_0} \cdot \left(R_e + \sum_{n-1} R \right) = 18 - \frac{18 + 10,3}{1,02} \cdot \left(0,115 + \frac{0,4}{0,58} \right) = -4,3^{\circ}C$$

На наружной поверхности R_x будет определяться как сумма термического сопротивления тепловосприятию R_e и термического сопротивления всей стены из туфобетона общей толщиной 50 см

$$\tau_6 = \tau_n = t_e - \frac{t_e - t_n}{R_0} \cdot \left(R_e + \sum_{n-1} R \right) = 18 - \frac{18 + 10,3}{1,02} \cdot \left(0,115 + \frac{0,5}{0,58} \right) = -9,1^{\circ}C$$

Таблица 1 – Результаты расчета стационарного влажностного режима сплошной лег-кобетонной стены в зимний период

Показатель	Границы слоев							Наруж-ный воздух
	Внут-ренний воздух	1	2	3	4	5	6	
Температура t (τ), $^{\circ}C$	18	14,8	10,0	5,3	0,5	-4,3	-9,1	-10,3
Упругость водяного пара e , Па								
Максимальная упругость водяного пара E , Па								

Нанесем полученные значения температур на границы слоев стены в соответствующем масштабе и построим линию падения температуры (линия τ на рисунке 1).

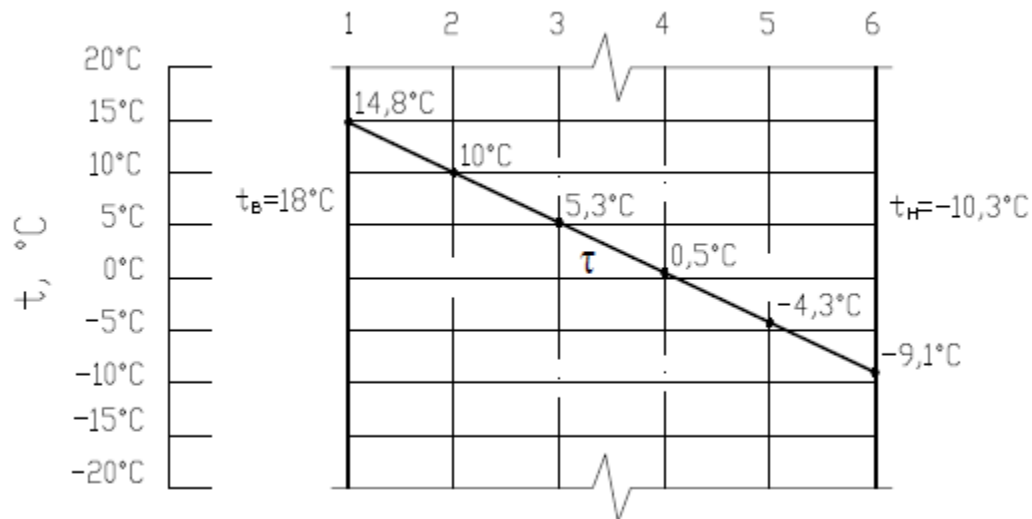


Рисунок 1 - Схема стационарного влажностного режима сплошной легкобетонной стены в зимний период

Далее по выявленным значениям температур на границах слоев с помощью справочных таблиц определяем значения максимальной упругости водяного пара в ограждении, заносим данные в таблицу 1 и строим линию изменения (линия E на рисунке 1)

Так, при $t_{в} = 18^\circ\text{C}$ максимальная упругость водяного пара E составит 2064 Па (см. справочную таблицу 3) и т.д. Для отрицательных температур значение E находим интерполяцией.

Таблица 1 – Результаты расчета стационарного влажностного режима сплошной легкобетонной стены в зимний период

Показатель	Границы слоев							
	Внутренний воздух	1	2	3	4	5	6	Наружный воздух
Температура $t (\tau), ^\circ\text{C}$	18	14,8	10,0	5,3	0,5	-4,3	-9,1	-10,3
Упругость водяного пара e , Па								
Максимальная упругость водяного пара E , Па	2064	1683	1228	891	633	426	282	253

Таблица 2 (справочная) - Максимальная упругость насыщенного водяного пара E , Па, для отрицательных температур

$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$
0	611	-5,4	388	-10,6	245	-16	151	-23	77
-0,2	601	-5,6	381	-10,8	241	-16,2	148	-23,5	73
-0,4	592	-5,8	375	-11	237	-16,4	145	-24	69
-0,6	581	-6	368	-11,2	233	-16,6	143	-24,5	65
-0,8	573	-6,2	363	-11,4	229	-16,8	140	-25	63
-1	563	-6,4	356	-11,6	225	-17	137	-25,5	60
-1,2	553	-6,6	351	-11,8	221	-17,2	135	-26	56
-1,4	544	-6,8	344	-12	217	-17,4	132	-27	51
-1,6	535	-7	337	-12,2	213	-17,6	129	-28	45
-1,8	527	-7,2	332	-12,4	209	-17,8	128	-29	41
-2	517	-7,4	327	-12,6	207	-18	125	-30	37
-2,2	509	-7,6	321	-12,8	203	-18,2	123	-31	33,6
-2,4	500	-7,8	315	-13	199	-18,4	120	-32	30,3
-2,6	492	-8	309	-13,2	195	-18,6	117	-33	27,3
-2,8	484	-8,2	304	-13,4	191	-18,8	116	-34	24,7
-3	476	-8,4	299	-13,6	188	-19	113	-35	22,3
-3,2	468	-8,6	293	-13,8	184	-19,2	111	-36	20,0
-3,4	460	-8,8	289	-14	181	-19,4	109	-37	17,9
-3,6	452	-9	284	-14,2	179	-19,6	107	-38	15,9
-3,8	445	-9,2	279	-14,4	175	-19,8	105	-39	14,0
-4	437	-9,4	273	-14,6	172	-	-	-40	12,4
-4,2	429	-9,6	268	-14,8	168	-20	103	-41	10,9
-4,4	423	-9,8	264	-15	165	-20,5	99	-42	9,6
-4,6	415	-	-	-15,2	163	-21	93	-43	8,4
-4,8	408	-10	260	-15,4	159	-21,5	89	-44	7,3
-5	401	-10,2	255	-15,6	156	-22	85	-45	6,4
-5,2	395	-10,4	251	-15,8	153	-22,5	81	-	-

Таблица 3 (справочная) - Максимальная упругость насыщенного водяного пара E , Па, для положительных температур

$t, ^\circ\text{C}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$t, ^\circ\text{C}$
0	611	615	620	624	629	633	639	643	648	652	0
1	657	661	667	671	676	681	685	691	696	701	1
2	705	711	716	721	727	732	737	743	748	753	2
3	759	764	769	775	780	785	791	796	803	808	3
4	813	819	825	831	836	843	848	855	860	867	4
5	872	879	885	891	897	904	909	916	923	929	5
6	935	941	948	955	961	968	975	981	988	995	6
7	1001	1023	1016	1023	1029	1037	1044	1051	1059	1065	7
8	1073	1080	1088	1095	1103	1109	1117	1125	1132	1140	8

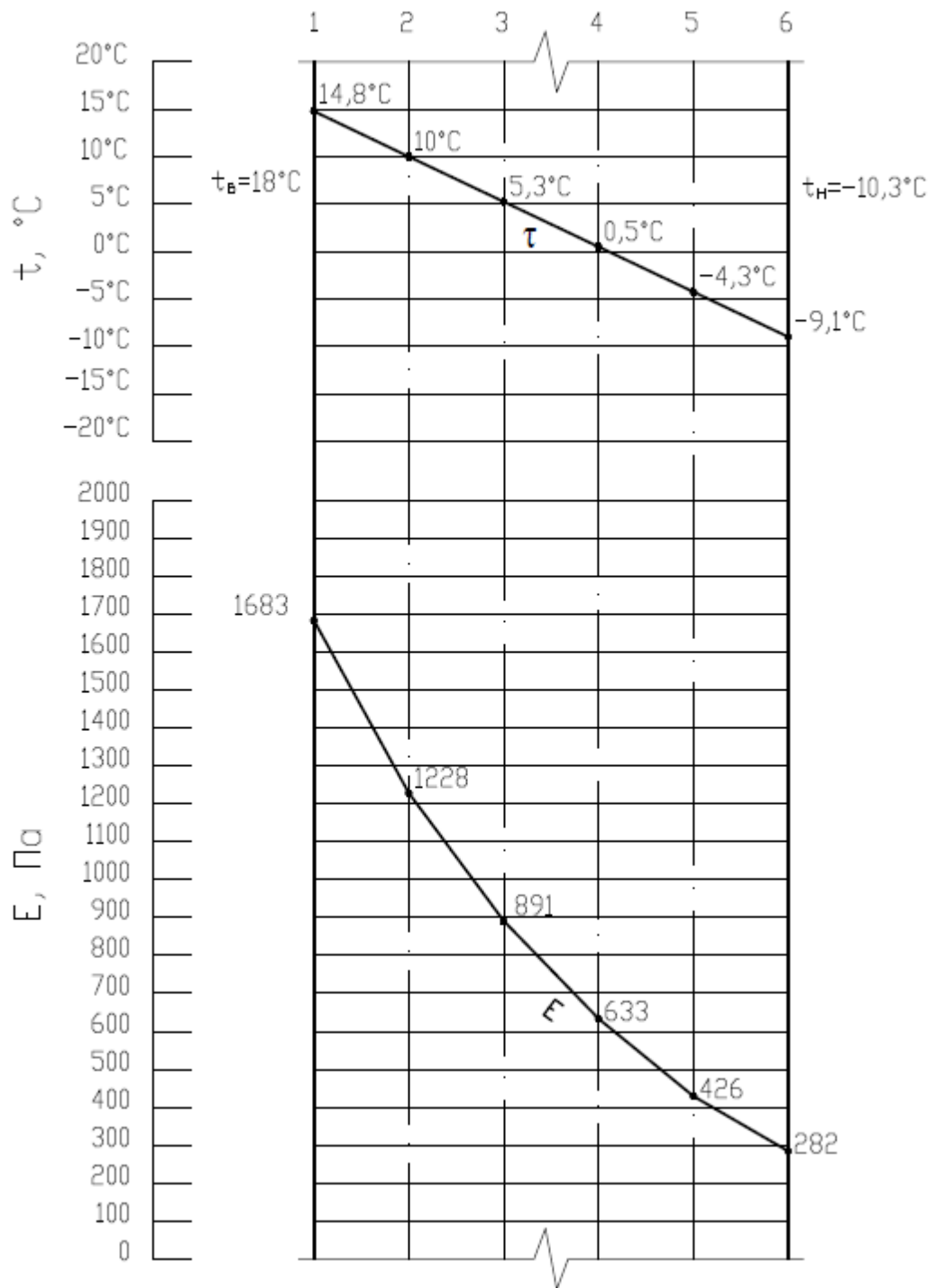


Рисунок 1 - Схема стационарного влажностного режима сплошной легкобетонной стены в зимний период

По значениям максимальной упругости водяного пара в ограждении можно определить значения действительной упругости водяного пара и построить линию падения e , воспользовавшись формулой:

$$e_n = e_e - \frac{e_e - e_n}{R_{0,п}} \cdot \sum_{n-1} R_{п}$$

где e_n — упругость водяного пара на внутренней поверхности любого n -го слоя ограждения, Па; $\sum_{n-1} R_{п}$ — сумма сопротивлений паропроницанию $n-1$ первых слоев ограждения, считая от его внутренней поверхности, включая и сопротивление влагообмену у внутренней поверхности $R_{вп}$, ($m^2 \cdot ч \cdot Па$)/мг.

Таким образом, в начале следует определить упругость водяного пара внутреннего e_e и наружного e_n воздушных, а также величину сопротивления паропроницанию стены $R_{п0}$.

Парциальное давление водяного пара (действительную упругость водяного пара) e можно определить по формуле 8.3 СП 50.13330.2012:

$$e = \frac{\varphi \cdot E}{100\%}$$

Тогда при $\varphi_{в}=55\%$ и $E = 2064$ Па, соответствующего $t_{в}= 18^{\circ}C$

$$e_e = \frac{\varphi \cdot E}{100\%} = \frac{55 \cdot 2064}{100} = 1135 \text{ Па}$$

При $t_{н}= -10,3^{\circ}C$ максимальная упругость водяного пара E составит 255 МПа, относительная влажность наружного воздуха составляет $\varphi_{н}=86\%$

$$e_n = \frac{\varphi \cdot E}{100\%} = \frac{86 \cdot 253}{100} = 218 \text{ Па}$$

Сопротивление паропроницанию стены определяется по формуле 8.9 СП 50.13330.2012:

$$R_{п.0} = R_{1.п} + \dots + R_{n.п} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \dots + \frac{\delta_n}{\mu_n}$$

Поскольку в нашем случае наружная стена состоит из одного слоя в виде легкого бетона $\gamma = 1400$ кг/м³ толщиной 500 мм, а согласно приложения Т СП 50.13330.2012 коэффициент паропроницаемости μ туфобетона плотностью $\gamma_{кл} = 1400$ кг/м³ (поз. 93 таблицы) составит $\mu = 0,11$ мг/м·ч·Па, то сопротивление паропроницанию стены составит

$$R_{п0} = \frac{\delta_s}{\mu_s} = \frac{0,5}{0,11} = 4,55 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$$

Рассчитаем распределение упругость водяного пара в стеновом ограждении на границах слоев по формуле

$$e_n = e_в - \frac{e_в - e_н}{R_{0,п}} \cdot \sum_{n-1} R_{п}$$

и для удобства сведем все данные в таблицу 1.

Так как сопротивление влагообмену у внутренней поверхности $R_{вп}$ и сопротивление влагообмену у наружной поверхности $R_{нп}$ очень малы и ими можно пренебречь, то упругость водяного пара на внутренней поверхности ограждения e_1 будет равна упругости водяного пара внутреннего воздуха $e_в$ и, соответственно, упругость водяного пара на наружной поверхности ограждения e_6 будет равна упругости водяного пара наружного воздуха $e_н$.

На границе 1-го и 2-го слоев ΣR_n будет определяться как сопротивление паропроницанию 1-го слоя из туфобетона толщиной 10 см

$$e_2 = e_в - \frac{e_в - e_н}{R_{0,п}} \cdot \sum_{n-1} R_{п} = 1135 - \frac{1135 - 218}{4,55} \cdot \frac{0,1}{0,11} = 952 \text{ Па}$$

На границе 2-го и 3-го слоев ΣR_n будет определяться как сопротивление паропроницанию 1-го и 2-го слоев из туфобетона общей толщиной 20 см

$$e_3 = e_в - \frac{e_в - e_н}{R_{0,п}} \cdot \sum_{n-1} R_{п} = 1135 - \frac{1135 - 218}{4,55} \cdot \frac{0,2}{0,11} = 769 \text{ Па}$$

На границе 3-го и 4-го слоев ΣR_n будет определяться как сопротивление паропроницанию 1-го, 2-го и 3-го слоев из туфобетона общей толщиной 30 см

$$e_4 = e_в - \frac{e_в - e_н}{R_{0,п}} \cdot \sum_{n-1} R_{п} = 1135 - \frac{1135 - 218}{4,55} \cdot \frac{0,3}{0,11} = 585 \text{ Па}$$

На границе 4-го и 5-го слоев R_x будет определяться как сумма термического сопротивления тепловосприятую $R_в$ и термического сопротивления 1-го, 2-го, 3-го и 4-го слоев из туфобетона общей толщиной 40 см

$$e_5 = e_в - \frac{e_в - e_н}{R_{0,п}} \cdot \sum_{n-1} R_{п} = 1135 - \frac{1135 - 218}{4,55} \cdot \frac{0,4}{0,11} = 402 \text{ Па}$$

Далее полученные значения упругости водяного пара e заносим в таблицу 1 и строим линию изменения (линия e на рисунке 1).

Таблица 1 – Результаты расчета стационарного влажностного режима сплошной лег-кобетонной стены в зимний период

Показатель	Границы слоев							
	Внут-ренний воздух	1	2	3	4	5	6	Наруж-ный воздух
Температура t (τ), $^{\circ}\text{C}$	18	14,8	10,0	5,3	0,5	-4,3	-9,1	-10,3
Упругость водяного пара e , Па	1135	1135	952	769	585	402	218	218
Максимальная упругость водяного пара E , Па	2064	1683	1228	891	633	426	282	253

Проанализируем рисунок 1. Если линии E и e не пересекаются, то это указывает на отсутствие конденсации водяного пара в ограждении, т. к. при этом в любой плоскости ограждения действительная упругость водяного пара оказывается ниже максимальной упругости, что исключает возможность конденсации водяного пара. Если же линии E и e пересекаются, то это значит, что в ограждении возможна конденсация водяного пара.

В нашем случае линии E и e не пересекаются, а значит конденсации водяного пара в ограждении не будет.

Вывод: Анализ полученного графическим методом влажностного режима наружной стены из туфобетона $\rho=1400\text{кг/м}^3$ толщиной 50 см в н.п. Петрозаводск (Республика Карелия) в наиболее холодный месяц при $t_{\text{в}}=18^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{\text{в}}=55\%$ показал, что *возможность конденсации водяного пара в ограждении отсутствует.*

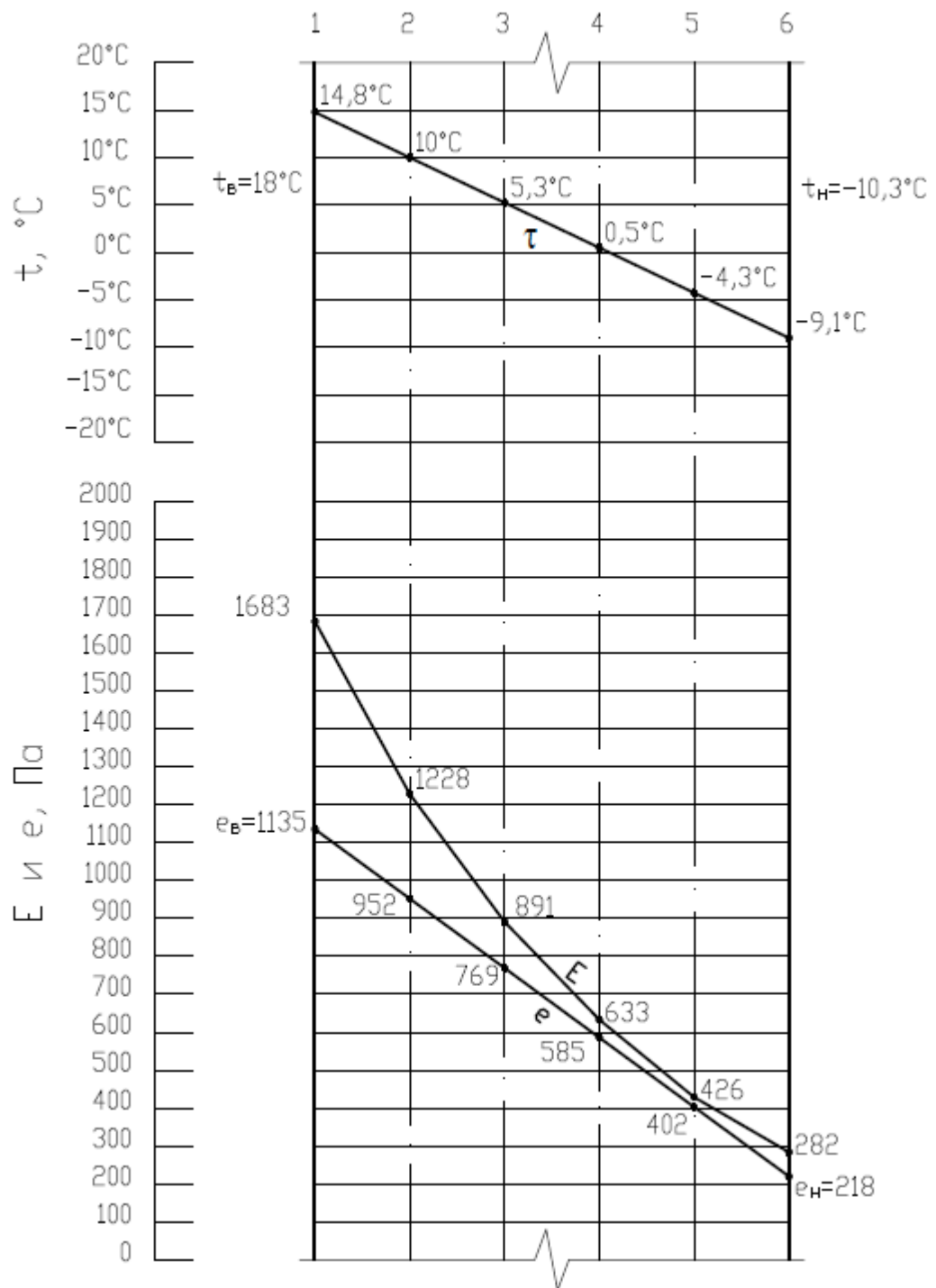


Рисунок 1 - Схема стационарного влажностного режима сплошной легкобетонной стены в зимний период