

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра отопления и вентиляции

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ
И ПОМЕЩЕНИЯ

Методические указания и примеры расчетов
к курсовой работе по курсу Строительная теплофизика
(выпуск 6)

МОСКВА 2004

6.1. Нестационарный тепловой режим наружной стены

Требуется определить время остывания внутренней поверхности наружной стены до 0°C после внезапного отключения отопления при расчетных наружных условиях ($t_H = t_s^{0.92} = -30^{\circ}\text{C}$). Расчет выполняется на ЭВМ.

6.1.1. Постановка задачи.

Считаем, что после отключения отопления прекращается поступление теплового потока на внутреннюю поверхность наружной стены, то есть тепловой поток на внутренней поверхности $Q_{в.п}=0$. Сформулируем математическую запись задачи.

Пусть в стене M слоев. Пронумеруем их от наружного к внутреннему: $1, 2, \dots, m, \dots, M$. Внутри каждого однородного слоя наружной стены процесс описывается уравнением теплопроводности:

$$c_m \cdot \rho_m \frac{dt(x, z)}{dz} = \lambda_m \frac{d^2 t(x, z)}{dx^2}$$

где: c_m, ρ_m, λ_m - удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности каждого m -того слоя;

$t(x, z)$ - температура, меняющаяся по толщине слоя и во времени;

x - текущая координата;

z - текущее время;

m - номер рассматриваемого слоя.

На стыках слоев задается равенство температур и тепловых потоков (граничное условие IV рода):

$$t_{m-1} = t_m$$
$$\lambda_{m-1} \frac{dt_{m-1}}{dx} = \lambda_m \frac{dt_m}{dx},$$

где $m-1, m$ - номера стыкующихся слоев.

На наружной поверхности стены учитывается теплообмен этой поверхности с наружным воздухом (граничное условие III рода):

$$-\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = \alpha_H (t_H - t_1),$$

где α_H - коэффициент теплообмена на наружной поверхности стены,

t_H - температура наружного воздуха, которая на протяжении процесса остывания стены остается постоянной и равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью $0,92 t_s^{0.92}, ^{\circ}\text{C}$, по п.1.1. $t_H = -31^{\circ}\text{C}$;

На внутренней поверхности стены, как уже говорилось, задается отсутствие теплового потока:

$$\frac{dt_m}{dx} = 0$$

В качестве начальных условий принимаем распределение температуры в стенке в стационарных условиях при постоянных температурах наружного t_H и внутреннего t_B воздуха.

6.1.2. Решение задачи.

Сначала стенка разбивается на слои толщиной 1 см и определяются начальные условия - начальные температуры в каждом элементарном слое.

Затем методом конечных разностей по неявной схеме определяются температуры в каждом элементарном слое с шагом по времени, равным 1 часу (неявная схема не требует жесткой связи между шагами по времени и по координате).

Ниже приведен пример диалога и представлен пример распечатки с ЭВМ для наружной стены. В этой распечатке на ось абсцисс вручную нанесена шкала температур внутренней поверхности стены в соответствии со значениями, рассчитанными для каждого часа.

В исходных данных в качестве коэффициентов теплопроводности приняты фиктивные коэффициенты ($\lambda/\text{г}$).

6.1.3. Диалог

введите имя файла для записи результатов счета:

<maljavin.res

ПРОГРАММА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ

ВЕРСИЯ ДИАЛОГ

ВВЕДИТЕ ФАМИЛИЮ И.О. ФАКУЛЬТЕТ КУРС ГРУППУ

<Малявина Е.Г. каф.ОВ

ВВЕДИТЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГРАЖДЕНИЯ

КОЛИЧЕСТВО СЛОЕВ $KS=$

<4

ТОЛЩИНА 1 СЛОЯ (М) $DS=$

<0.12

КОЭФ. ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ 1 СЛОЯ ($\text{ВТ/М}^{\circ}\text{К}$) $LAM=$

<0.667

ТЕПЛОЕМКОСТЬ 1 СЛОЯ ($\text{КДЖ/МКУБ}^{\circ}\text{К}$) $CR=C*RO=$

<1408.

ТОЛЩИНА 2 СЛОЯ (М) $DS=$

<0.15

КОЭФ. ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ 2 СЛОЯ ($\text{ВТ/М}^{\circ}\text{К}$) $LAM=$

<0.074

ТЕПЛОЕМКОСТЬ 2 СЛОЯ ($\text{КДЖ/МКУБ}^{\circ}\text{К}$) $CR=C*RO=$

<105.

ТОЛЩИНА 3 СЛОЯ (М) $DS=$

<0.25

КОЭФ. ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ 3 СЛОЯ ($\text{ВТ/М}^{\circ}\text{К}$) $LAM=$

<0.805

ТЕПЛОЕМКОСТЬ 3 СЛОЯ ($\text{КДЖ/МКУБ}^{\circ}\text{К}$) $CR=C*RO=$

<1584.

ТОЛЩИНА 4 СЛОЯ (М) $DS=$

<0.02

КОЭФ. ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ 4 СЛОЯ ($\text{ВТ/М}^{\circ}\text{К}$) $LAM=$

<0.851

ТЕПЛОЕМКОСТЬ 4 СЛОЯ ($\text{КДЖ/МКУБ}^{\circ}\text{К}$) $CR=C*RO=$

<1512.

ВВЕДИТЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛООБМЕНА ($\text{ВТ/МКВ}^{\circ}\text{К}$)

-НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ $ALH=$

<23.

-НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ $ALB=$

<8.7

РЕЖИМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С НАРУЖНОЙ И С
ВНУТРЕННЕЙ СТОРОНЫ ОГРАЖДЕНИЯ

- (1) $T=CONST$
 - (2) $T=TC+AT \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (TIME-ZM)/24.)$
 - (3) РЕЖИМ РЕЗКОГО ПОХОЛОДАНИЯ
 - (4) УЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ
 - (5) ОХЛОЖДЕНИЕ ОГРАЖДЕНИЯ $Q=0$
 - (6) ТАБЛИЦА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
- ВВЕДИТЕ НОМЕР РЕЖИМА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ВОЗДУХА С НАРУЖНОЙ СТОРОНЫ ОГРАЖДЕНИЯ
IRH=

<1

ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА ("C) T=

<-31.

ВВЕДИТЕ НОМЕР РЕЖИМА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
С ВНУТРЕННЕЙ СТОРОНЫ ОГРАЖДЕНИЯ
IRB=

<5

ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ ДО ВЫКЛЮЧЕНИЯ
СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ("C) TПН=

<19.

ТЕМПЕРАТУРА ДО КОТОРОЙ ОХЛОЖДАЕТСЯ ВНУТРЕННЯЯ
ПОВЕРХНОСТЬ ОГРАЖДЕНИЯ ("C) TПК=

<0.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСЧЕТА
ВРЕМЯ КОНЦА РАСЧЕТА (ЧАС) TIMEK=

<50

ЧИСЛО ТОЧЕК РАСЧЕТА IT=

<50

РЕЖИМ ВЫДАЧИ НА ПЕЧАТЬ IРС=

<3

Результаты расчета

Малявина Е.Г.

-- НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА --

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ СЛОЕВ

СЛОЙ	ТОЛЩИНА (М)	КОЭФ. ТЕПЛОПРОВ. (Вт/м*°K)	ТЕПЛОЕМКОСТЬ (кДж/куб.м*°K)
1	.120	.900	1232.0
2	.180	.080	84.0
3	.250	1.040	1584.0
4	.020	.903	1512.0

КОЭФ. ТЕПЛООБМЕНА (Вт/кв.м*°K) ALH=23.00 ALB= 8.70

ШАГ ПО ВРЕМЕНИ НТ (ЧАС) 1.00 ШАГ ПО КООРДИНАТЕ НХ (М) .0100

ВРЕМЯ ТН ТН.ПОВ ТВ.ПОВ ТЕМПЕРАТУРА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
(ЧАС) ("C) ("C) ("C) I-----

.00 -30.0 -29.26 16.03 I

1.00 -30.0 -29.25 15.11 I

I
I
I

2.00	-30.0	-29.24	14.72	I
3.00	-30.0	-29.23	14.42	I
4.00	-30.0	-29.23	14.18	I
5.00	-30.0	-29.23	13.97	I
6.00	-30.0	-29.23	13.77	I
7.00	-30.0	-29.23	13.58	I
8.00	-30.0	-29.23	13.41	I
9.00	-30.0	-29.23	13.24	I
10.00	-30.0	-29.23	13.07	I
11.00	-30.0	-29.23	12.91	I
12.00	-30.0	-29.23	12.75	I
13.00	-30.0	-29.23	12.60	I
14.00	-30.0	-29.24	12.44	I
15.00	-30.0	-29.24	12.29	I
16.00	-30.0	-29.24	12.13	I
17.00	-30.0	-29.24	11.98	I
18.00	-30.0	-29.24	11.83	I
19.00	-30.0	-29.25	11.68	I
20.00	-30.0	-29.25	11.53	I
21.00	-30.0	-29.25	11.38	I
22.00	-30.0	-29.25	11.24	I
23.00	-30.0	-29.26	11.09	I
24.00	-30.0	-29.26	10.94	I
25.00	-30.0	-29.26	10.80	I
26.00	-30.0	-29.27	10.65	I
27.00	-30.0	-29.27	10.51	I
28.00	-30.0	-29.27	10.36	I
29.00	-30.0	-29.27	10.22	I
30.00	-30.0	-29.28	10.08	I
31.00	-30.0	-29.28	9.93	I
32.00	-30.0	-29.28	9.79	I
33.00	-30.0	-29.28	9.65	I
34.00	-30.0	-29.29	9.51	I
35.00	-30.0	-29.29	9.37	I
36.00	-30.0	-29.29	9.23	I
37.00	-30.0	-29.29	9.09	I
38.00	-30.0	-29.30	8.95	I
39.00	-30.0	-29.30	8.81	I
40.00	-30.0	-29.30	8.67	I
41.00	-30.0	-29.30	8.54	I
42.00	-30.0	-29.31	8.40	I
43.00	-30.0	-29.31	8.26	I
44.00	-30.0	-29.31	8.13	I
45.00	-30.0	-29.31	7.99	I
46.00	-30.0	-29.32	7.85	I
47.00	-30.0	-29.32	7.72	I
48.00	-30.0	-29.32	7.59	I
49.00	-30.0	-29.32	7.45	I

8. 10. 12. 14. 16.t°C

-----+-----+-----+-----+-----

Выполненный расчет свидетельствует о том, что за 50 часов стена не остывает до 0°C. Значит времени для ремонта системы отопления достаточно.

6.2. Нестационарный тепловой режим помещения

Требуется определить, укладывается ли амплитуда колебаний температуры помещения при отоплении пропусками в допускаемые +1,5°C.

В здании, присоединенном к системе теплоснабжения, в теплую часть отопительного периода из-за необходимости иметь достаточно высокую температуру для горячего водоснабжения, температура воды для отопления выше, чем это необходимо для поддержания заданной температуры помещения, поэтому применяют отопление пропусками, то есть m часов теплоноситель циркулирует, а затем на n часов циркуляция прекращается. Требуется рассчитать амплитуду колебаний температуры помещения при заданной продолжительности натопа $m=8$ ч и перерыва $n=4$ ч и при температуре наружного воздуха +5°C.

6.2.1. Определяем теплоотдачу отопительного прибора помещения 206 при заданной t_H и при заданном режиме отопления:

$$Q = Q_{T.п.} \cdot \frac{t_B - 5}{t_B - t_5^{92}} \cdot \frac{m+n}{m} = 511,5 \cdot \frac{19-5}{19+31} \cdot \frac{8+4}{8} = 214,8 \text{ Вт},$$

здесь $Q_{T.п.} = 511,5$ Вт - теплопотери помещения при расчетной температуре наружного воздуха $t_H = -31^\circ\text{C}$ (см. выпуск 5).

6.2.2. Определяем коэффициенты теплоусвоения Y_i внутренних поверхностей всех ограждений:

- наружная стена: внутренний слой - штукатурка, толщиной 0,02 м, с термическим сопротивлением $R_{шт} = 0,023 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, коэффициентом теплоусвоения $s_{24,шт} = 9,6 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$. Для периода $m+n=8+4=12$ часов

$$s_{12,шт} = s_{24,шт} \cdot \sqrt{24/(m+n)} = 9,6 \cdot \sqrt{24/(8+4)} = 13,58 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

Тепловая инерция $D = R_{шт} \cdot s_{12,шт} = 13,58 \cdot 0,023 = 0,312 < 1$. Следовательно, в расчете необходимо учесть следующий слой - кладки из сплошного глиняного кирпича, толщиной 0,25 м, с термическим сопротивлением $R_{к.к.} = 0,31 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, коэффициентом теплоусвоения $s_{к.к.} = 9,2 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$. Для периода $m+n=8+4=12$ часов

$$s_{12,к.к.} = s_{24,к.к.} \cdot \sqrt{24/(m+n)} = 9,2 \cdot \sqrt{24/(8+4)} = 13,01 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

$$\text{Тепловая инерция } D = R_{к.к.} \cdot s_{12,к.к.} = 13,01 \cdot 0,31 = 4,03 > 1.$$

Так как тепловая инерция второго слоя больше 1:

$$Y_{H.C.} = \frac{R_{шт} \cdot s_{12,шт}^2 + s_{12,к.к.}}{1 + R_{шт} \cdot s_{12,к.к.}} = \frac{0,023 \cdot 9,6^2 + 9,2}{1 + 0,023 \cdot 9,2} = 9,34 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

$$s_{acc.с} = 17,98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{°C}}$$

- потолок: внутренний слой - железобетонная плита с $R_{пт} = 0,151 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, с коэффициентом теплоусвоения $s_{24,пт} = 10,159 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$ (величина усредненная с учетом тела ж/бетона и отверстий $[(0,22 \cdot 0,21 - 3,14 \cdot 0,16^2/4)/(0,22 \cdot 0,21)]$ $17,98 = 10,159$). Для периода $m+n=8+4=12$ часов

$$s_{12,пт} = s_{24,пт} \cdot \sqrt{24/(m+n)} = 10,159 \cdot \sqrt{24/(8+4)} = 14,36 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

$$\text{Тепловая инерция } D = R_{пт} \cdot s_{12,пт} = 14,36 \cdot 0,159 = 2,22 > 1.$$

Так как у первого слоя величина $D > 1$, то $Y_{ПТ} = s_{12,ПЛ} = 14,36 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$.

- перегородки: керамзитобетонные панели с $R_{пер} = 0,149 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, коэффициентом теплоусвоения $s_{24,ПЕР} = 9,06 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$. Для периода $m+n=8+4=12$ часов

$$s_{12,ПЕР} = s_{24,ПЕР} \cdot \sqrt{24/(m+n)} = 9,06 \cdot \sqrt{24/(8+4)} = 12,81 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

Тепловая инерция $D = R_{ПЕР} \cdot s_{12,ПЕР} = 0,149 \cdot 12,81 = 1,908 < 2$. Так как перегородки находятся в одинаковых тепловых условиях с обеих сторон и тепловая инерция каждой половины $D < 1$, то $Y_{ПЕР} = (R_{ПЕР} / 2) \cdot s_{пер}^2 = 0,149/2 \cdot 12,81^2 = 12,22 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$.

- окна: сопротивление теплопередаче окна $R_{ок} = 0,45 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$,

$$Y_{ОК} = \frac{\alpha_H}{1 + R \cdot \alpha_H} = \frac{1}{R_{ОК} - 1/\alpha_B} = \frac{1}{0,45 - 1/8,7} = 2,98 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

- пол: паркетный из дуба поперек волокон с сопротивлением теплопередаче слоя дуба $R_{дуб} = 0,083 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, с коэффициентом теплоусвоения $s_{24,ДУБ} = 5,0 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$. Для периода $m+n=8+4=12$ часов

$$s_{12,ДУБ} = s_{24,ДУБ} \cdot \sqrt{24/(m+n)} = 5,0 \cdot \sqrt{24/(8+4)} = 7,07 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

Тепловая инерция $D_{ДУБ} = R_{ДУБ} \cdot s_{12,ДУБ} = 0,083 \cdot 7,07 = 0,587 < 1$. Следовательно, в расчет следует ввести следующий слой - железобетонную плиту с термическим сопротивлением $0,112 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ и коэффициентом теплоусвоения $s_{24,Ж.Б} = 17,98 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$. Для периода $m+n=8+4=12$ часов

$$s_{12,Ж.Б} = s_{24,Ж.Б} \cdot \sqrt{24/(m+n)} = 17,98 \cdot \sqrt{24/(8+4)} = 25,4 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

Тепловая инерция слоя железобетона равна $D_{Ж.Б} = R_{Ж.Б} \cdot s_{12,Ж.Б} = 0,112 \cdot 25,4 = 2,85 > 1$. Следовательно,

$$Y_{ПЛ} = \frac{R_{ДУБ} \cdot s_{12,ДУБ}^2 + s_{12,Ж.Б}}{1 + R_{ДУБ} \cdot s_{12,Ж.Б}} = \frac{0,083 \cdot 7,07^2 + 25,4}{1 + 0,083 \cdot 25,4} = 9,51 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$$

6.2.1. Амплитуда колебаний внутренней температуры равна

$$A_t = \frac{0,9 \cdot Q}{\frac{1}{\Omega^{МАКС} / \sum Y_i F_i + 1/\alpha_K \sum F_i} + P_{ВЕНТ}} = \frac{0,9 \cdot 214,8}{\frac{1}{0,575/605,8 + 1/163,89} + 20} = \frac{193,3}{161,82} = 1,19$$

°C

здесь: $\Omega^{МАКС}$ - коэффициент прерывистости, определенный при отношении $m/T = m/(n+m) = 8/12 = 16/24$ по таблице учебника на стр. 336 или по рис. VII-5 на стр. 335 $\Omega^{МАКС} = 0,575$;

$\sum Y_i F_i$ - показатель теплоусвоения помещения,

$$\sum Y_i F_i = Y_{НС} \cdot F_{НС} + Y_{ПТ} \cdot F_{ПТ} + Y_{ПЕР} \cdot F_{ПЕР} + Y_{ОК} \cdot F_{ОК} + Y_{ПЛ} \cdot F_{ПЛ} = 9,34 \cdot 7,1 + 14,36 \cdot 8,14 + 12,22 \cdot 28,25 + 2,98 \cdot 3 + 9,51 \cdot 8,14 = 605,8 \text{ Вт/м}^2\text{°C};$$

α_K - средний коэффициент конвективного теплообмена на внутренних поверхностях ограждений, в соответствии с расчетом теплового режима помещения равный 3.

$$\alpha_K \sum F_i = 3(7,1 + 8,14 + 28,25 + 3 + 8,14) = 163,89 \text{ Вт/м}^2\text{°C}.$$

$P_{ВЕНТ}$ - показатель теплопоглощения вентиляционным воздухом,

$$P_{\text{ВЕНТ}} = 0,278L \cdot c\rho = 0,278 \cdot 60 \cdot 1,2 = 20 \text{ Вт/м}^2\text{°С}.$$

Вывод: так как полученная амплитуда колебаний температуры помещения меньше допускаемой ($1,17 < 1,5$), отопление пропусками в принятом режиме допустимо.