

4. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

4.1. РАСЧЕТ ДВУМЕРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

4.1.1. Введение

Двумерные или трехмерные температурные поля в ограждающих конструкциях возникают там, где тепловой поток не может двигаться равномерно в одном направлении. Происходит это либо потому, что сама конструкция имеет изогнутую форму, например, в углу наружной стены, либо в конструкции находятся более теплопроводные, чем ее тело связи, удерживающие отдельные слои вместе, либо одна конструкция примыкает к другой, например, окно, примыкающее к наружной стене, имеет откосы, которые искривляют температурное поле стены. Так как специалиста по отоплению в этой ситуации интересуют среднее по площади ограждения сопротивление теплопередаче (для определения теплопотерь) и наиболее низкая температура на внутренней поверхности этого ограждения (для проверки отсутствия конденсата в локальных точках), то возникает задача расчета неоднородного температурного поля.

4.1.2. Аналогия между процессами теплопроводности и электропроводимости

Одним из методов расчета двумерного температурного поля является метод моделирования процесса теплопроводности с помощью электропроводимости. Возможность такой замены обоснована аналогией между ними, подтверждающейся одинаковым математическим описанием обоих процессов дифференциальными уравнениями [1].

В процессах теплопроводности и электропроводимости существуют соответствующие друг другу прямые аналогии, которые приведены в табл. 4.1.1. Так как работа основана на измерении внесистемных единиц электрических потенциалов, в табл.1 и далее помимо единиц системы СИ приведены также и примененные в работе единицы измерения.

Таблица 4.1.1 Прямые аналогии в тепловом и электрическом полях

<u>Тепловое поле</u>	<u>Электрическое поле</u>
Температура, потенциал переноса теплоты, $t, ^\circ\text{C}$	Напряжение, электрический потенциал U , В или ед. потенциала.
Количество теплоты, Q , Дж	Количество электричества, Кул или ед. колич. эл.
Теплопроводность материала λ , $\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C}) = \text{Дж}/(\text{с}^\circ\text{C})$	Электрическая проводимость $1/\rho$, Кул/((с·м·В) или ед. колич. эл./((с·м·ед.потенциала), где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.
Термическое сопротивление однородного ограждения площадью A , м^2 , и толщиной Δ_t , м, $R_t = \Delta_t / (A \cdot \lambda)$, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Электрическое сопротивление проводника сечением S , м^2 , и длиной Δ_3 , м, $R_3 = \Delta_3 \cdot \rho / S$, Ом или ед.потенциала·с/(ед. колич. эл.)
Тепловой поток, $q = \Delta t / R_t$, $\text{Дж}/\text{с} = \text{Вт}$	Сила электрического тока $I = \Delta U / R_3$, А или ед. колич эл./с

Часто приходится решать задачи теплопередачи, а не только теплопроводности. Но в электрическом поле нет аналогов коэффициентам теплоотдачи на внутренней α_v , $\text{Вт}/(\text{м}^2^\circ\text{C})$, и на наружной α_n , $\text{Вт}/(\text{м}^2^\circ\text{C})$, поверхностях. Поэтому, процесс теплоотдачи на поверхностях ограждения при электромоделировании заменяется процессом

теплопроводности, и граничные условия третьего рода заменяются на граничные условия первого рода.

4.1.3. Электрические модели

Как правило, все способы решения тепловых задач с помощью электротеплового моделирования разделяют на две группы [2]. К одной группе относят способы, использующие модель из материала с непрерывной проводимостью. Модели этой группы называют «геометрическими аналогами», так как они повторяют геометрию моделируемой системы и ее непрерывный характер. В другую группу входят способы, создающие модель из эквивалентных электрических цепей с сосредоточенными электрическими характеристиками (сопротивлением и т.д.). Модели второй группы называют «моделирующими цепями».

В настоящей работе применяются модели из тонкого листа токопроводящей графитовой бумаги, работающие по принципу «геометрического аналога».

Электрическая модель вырезается из листа по форме, геометрически подобной оригиналу; условия на границах задаются контактами из листовой латуни.

4.1.4. Методика решения задач на электромоделю

На рис.1 слева изображено сечение глады наружной стены, а справа – электрическая модель этого ограждения. Так как все рассуждения, приведенные ниже, сохраняют силу и для сечения конструкций с двумерным температурным полем для простоты на рис.1 слева рассмотрено однородное ограждение с одномерным распределением температуры. Изотермы в сечении такой стены горизонтальны. Справа представлена электромодель - геометрический аналог той же стены.

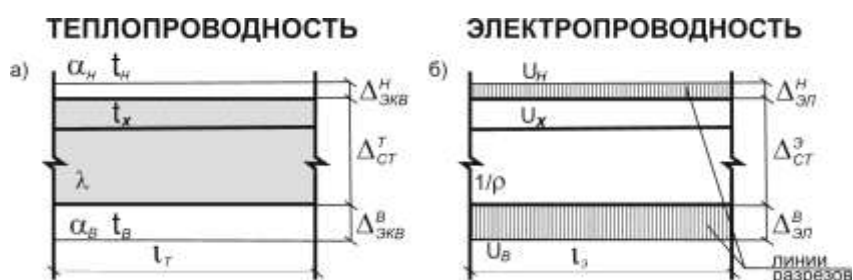


Рис. 4.1.1. Электротепловая аналогия:
а) сечение наружной стены; б) электромодель стены

В модели толщине стены $\Delta_{ст}^T$, м, соответствует $\Delta_{ст}^Э$, м, а длине стены l_t , м, соответствует $l_э$, м.

Введем в тепловой модели на внутренней и наружной поверхностях стены дополнительные слои, эквивалентные своим сопротивлением теплопроводности реальному сопротивлению теплоотдачи $\Delta_{экв}^B$, м, и $\Delta_{экв}^H$, м. Толщины эквивалентных слоев на внутренней и наружной поверхностях стены, м, равны:

$$\Delta_{экв}^B = \frac{\lambda}{\alpha_в}, \Delta_{экв}^H = \frac{\lambda}{\alpha_н}, \quad (4.1.1)$$

где

λ – теплопроводность материала стены, Вт/(м·К);

$\alpha_в, \alpha_н$ – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, Вт/(м²·К);

В электрическом поле аналогами эквивалентных слоев будут $\Delta_{эл}^B$, м, и $\Delta_{эл}^H$, м. Эти слои должны обладать проводимостью только в одном, перпендикулярном поверхности ограждения направлении. Проводимость электрического тока в этих слоях в направлении, параллельном поверхности, устраняется разрезами, показанными на рис. 1б.

Если на поверхности эквивалентных слоев ограждения заданы значения температуры внутреннего $t_в$ и наружного $t_н$ воздуха, то распределение температуры по сечению ограждения в общем случае определяется величинами $1/\lambda$, $\Delta_{экв}^B$, $\Delta_{ст}^T$, $\Delta_{экв}^H$, l_T . Аналогичное распределению температуры в сечении стены распределение электрического потенциала на электромоделю зависит от значений ρ , $\Delta_{эл}^B$, $\Delta_{ст}^Э$, $\Delta_{эл}^H$, $l_Э$, где ρ – удельное электрическое сопротивление токопроводящей бумаги, Ом·м или м·ед.потенц./с/(ед. колич. эл.).

Для того, чтобы процессы были подобны друг другу необходимо соблюдать следующие масштабные соотношения:

- масштаб температуры, °C/(ед. потенциала):

$$m_t = \frac{t_в - t_н}{U_в - U_н}, \quad (4.1.2)$$

- масштаб длин, м/м:

$$m_l = \frac{l_T}{l_Э} = \frac{\Delta_{ст}^T}{\Delta_{ст}^Э} = \frac{\Delta_{экв}^B}{\Delta_{эл}^B} = \frac{\Delta_{экв}^H}{\Delta_{эл}^H}. \quad (4.1.3)$$

- масштаб сопротивлений, $\frac{м \cdot ^\circ C / Вт}{м \cdot ед.потенц. \cdot с / ед.колич.эл.}$:

$$m_{1/\lambda} = \frac{1/\lambda}{\rho}. \quad (4.1.4)$$

В лабораторной работе рассматривается однородная наружная стена, поэтому масштаб сопротивлений не применяется. При моделировании неоднородных или многослойных ограждений следует при помощи масштаба сопротивлений $m_{1/\lambda}$ определить значения ρ для электромоделирования различных материалов, составляющих конструкцию. Чтобы изменить соотношение удельных сопротивлений, часть участков модели подвергается перфорации. Для этого участок разбивается на произвольное количество квадратов, и в центре каждого квадрата пробивается квадратное отверстие, размер которого рассчитывается в зависимости от необходимого соотношения удельных электрических сопротивлений двух участков из различных материалов.

Чтобы подвести к границам эквивалентных слоев электрические потенциалы, моделирующие температуру внутреннего и наружного воздуха, на модели за эквивалентными слоями предусматриваются еще полоски, расширяющие модель с каждой стороны на 5 мм, которые уйдут под зажим контактов.

4.1.5. Конструкция моделирующего устройства

В лабораторной работе используется установка, разработанная и изготовленная в лаборатории отопления и вентиляции. Электрическая схема питания и измерения потенциалов представлена на рис. 2. Электромодель 1, вырезанная из токопроводящей бумаги, при помощи контактов 10 укрепляется на подставке 2. На контакты подается разность потенциалов $U_B - U_H$ от источника постоянного электрического тока. Источником электропитания в моделирующих установках обычно бывают электрические батарейки. Для удобства дальнейших расчетов и для обеспечения независимости от значения разности потенциалов, создаваемой электробатарейкой, всю эту разность потенциалов считают равной 100 ед. потенциала. То есть считаем, что на один из контактов, моделирующий температуру внутреннего воздуха, подается потенциал 100 ед. потенц., а на другом, моделирующем температуру наружного воздуха потенциал равен 0.

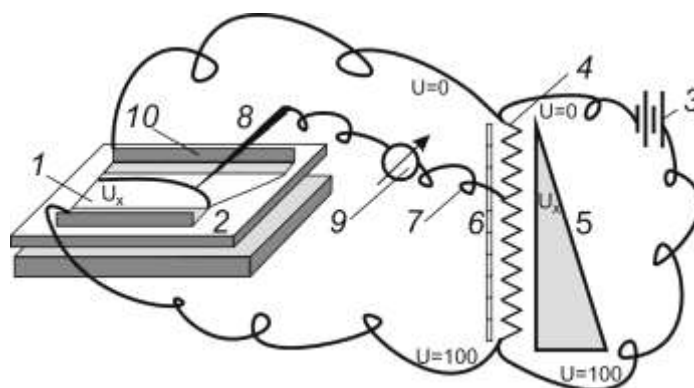


Рис 4.1.2. Электрическая схема питания и измерения потенциалов на приборе

Для измерения потенциалов на модели служит измерительное устройство, собранное по потенциометрической схеме. Делитель напряжения 4 (омическое сопротивление) присоединен параллельно электромодели. В делителе возникает линейное распределение потенциалов, показанное на рис. 2 в виде эпюры 5. Делитель снабжен шкалой 6, которая позволяет установить движок 7 в положение, соответствующее искомому значению потенциала.

Определение положения изопотенциальной линии на электромодели осуществляется при помощи щупа 8, последовательно передвигая который и отыскивая точки, соответствующие нулевому положению гальванометра 9 (нулевое положение возникает при одинаковых потенциалах в месте установки движка на делителе напряжения и в точке на модели).

В лабораторной работе делитель напряжения выполнен из ползункового реостата, снабженного шкалой с ценой деления 1 условная ед. потенц. В качестве щупов применяются графитовые карандаши. Грифель карандаша, кроме электропроводника, является еще и дополнительным электросопротивлением, уменьшающим ток, идущий через гальванометр во время отыскивания правильного положения щупа.

Передвигая движок делителя последовательно в различные положения, можно построить поле изопотенциальных линий.

4.1.6. Подготовка к выполнению лабораторной работы

В лабораторной работе следует определить расположение заданных изотерм в сечении наружного угла наружной стены. Предварительная подготовка к расчету температурного поля на модели из токопроводящей бумаги сводится к следующему:

- по заданным значениям α_b , α_n , Вт/(м²·К) и λ Вт/(м·К) определяются размеры эквивалентных слоев на поверхности ограждения по формулам (1);
- по известной толщине реальной стены Δ_{cm}^T и заданной толщине стены $\Delta_{cm}^{\mathcal{E}}$ на модели рассчитывается масштаб m_l длин по формуле (4.1.3);
- зная масштаб длин, находятся толщины эквивалентных слоев в электрической модели:

$$\Delta_{эл}^B = \frac{\Delta_{экв}^B}{m_l} \quad \text{и} \quad \Delta_{эл}^H = \frac{\Delta_{экв}^H}{m_l}. \quad (4.1.5)$$

- определяется масштаб температуры m_t по формуле (4.1.2) при условии, что значения температуры внутреннего t_b и наружного t_n воздуха заданы, разность потенциалов $U_b - U_n$ равна 100 ед. потенциала;
- по заданным значениям температуры t_x , °С, изотермы которых следует провести на электромодели, рассчитываются значения электропотенциалов, ед.потенц.:

$$U_x = \frac{t_x - t_n}{m_t}, \quad (4.1.6)$$

полученные значения потенциалов заносятся в таблицу 2:

Таблица 4.1.2. Электрические потенциалы, соответствующие заданным значениям температуры

Температура, t_x °С,	Электрически й потенциал, U_x , ед. потенц.
+5	
0	
-5	
-10	
-15	
-20	
-25	

- на листе токопроводящей бумаги вычерчивается модель сечения угла наружной стены. Причем, так как угол симметричен относительно линии, проходящей через вершину угла и внутренний угол, рассматривается только одна из симметричных сторон угла. Модель должна занимать всю длину выданной токопроводящей бумаги. Сама стена моделируется полосой заданной ширины $\Delta_{cm}^{\mathcal{E}}$, один край которой скошен линией, пересекающей обе грани стены под углом 45 град. к ним. Со стороны тупого угла находится внутренняя грань стены, со стороны острого – наружная. С каждой стороны строятся соответствующие эквивалентные слои, толщиной $\Delta_{эл}^B$, $\Delta_{эл}^H$. За ними откладываются слои под зажимы электроконтактов по 5 мм. Модель вырезается

ножницами. В пределах эквивалентных слоев лезвием делаются надрезы через 5-7 мм перпендикулярно поверхности ограждения.

4.1.7. Задание на моделирование

В лабораторной работе 4.1. исследуется стационарное температурное поле сечения угла наружной стены. Следует построить изотермы +5 °С, 0 °С, -5 °С, -10 °С, -15 °С, -20 °С, -25 °С. Задания выдаются по вариантам, приведенным в табл. 4.1.3:

Таблица 4.1.3. Варианты заданий

Вариант	Толщина стены, Δ_{cm}^T , м	Ширина модели $\Delta_{cm}^{\mathcal{E}}$, м	Температура наружного воздуха t_n , °С	Температура внутреннего воздуха t_b , °С	Теплопро- водность материала стены λ , Вт/(м·К)
1	2	3	4	5	6
1	0,25	0,1	-32	20	0,3
2	0,30	0,12	-30	22	0,35
3	0,36	0,1	-35	20	0,40
4	0,40	0,12	-37	22	0,25

4.1.8. Порядок выполнения работы

1. Модель встраивается в установку для электропитания и измерения потенциалов.
2. К границам эквивалентных слоев при помощи линейных контактов подводится разность потенциалов.
3. Находится местоположение потенциалов, составляющих искомые изотермы.
4. Определяется потенциал на внутренней поверхности угла стены, как наиболее низкая температура внутренней поверхности стены $U_{yг}$, ед. потенц., и полученный потенциал пересчитывается в температуру угла $t_{yг}$, °С:

$$t_{yг} = t_n + m_t \cdot U_{yг}. \quad (4.1.7)$$

5. Рассчитывается температура в углу заданной однородной стенки по формуле [3]:

$$t_{yг} = t_b - (R_b / R_o)^{2/3} \cdot (t_b - t_n), \quad (4.1.8)$$

где: R_b – сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стены, м² К/Вт, равное

$$R_b = 1 / \alpha_b, \quad (4.1.9)$$

здесь α_b – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности наружной стены, Вт/(м²·°С), принимаемый равным $\alpha_b = 8,7$ Вт/(м²·К),

R_o – общее сопротивление теплопередаче глади исследуемой однородной наружной стены, м²·К/Вт, определяемое по формуле:

$$R_o = 1 / \alpha_b + \Delta_{CT}^T / \lambda + 1 / \alpha_n, \quad (4.1.10)$$

здесь α_n – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности наружной стены, Вт/(м²·К), принимаемый равным $\alpha_n = 23$ Вт/(м²·К).

6. Сравниваются значения температуры на внутренней поверхности в углу наружной стены, вычисленные по результатам замера (4.1.7) и по формуле (4.1.8). Если результаты расходятся, необходимо перемерить $U_{\text{уг}}$.

4.1.8. Оформление результатов работы

Работа должна содержать:

1. Конспект всех разделов методического указания по Лабораторной работе 1 с рисунками и таблицей аналогов в тепловом и электрическом полях.
2. Чертеж модели с эквивалентными слоями, можно в масштабе М 1:2. На чертеже должны быть показаны найденные изотермы с подписанной температурой в °С и обозначенной температурой на внутренней поверхности угла. Пример схематично показан на рис. 3.
3. Расчет температуры на внутренней поверхности наружной стены в углу по данным замеров и аналитически.

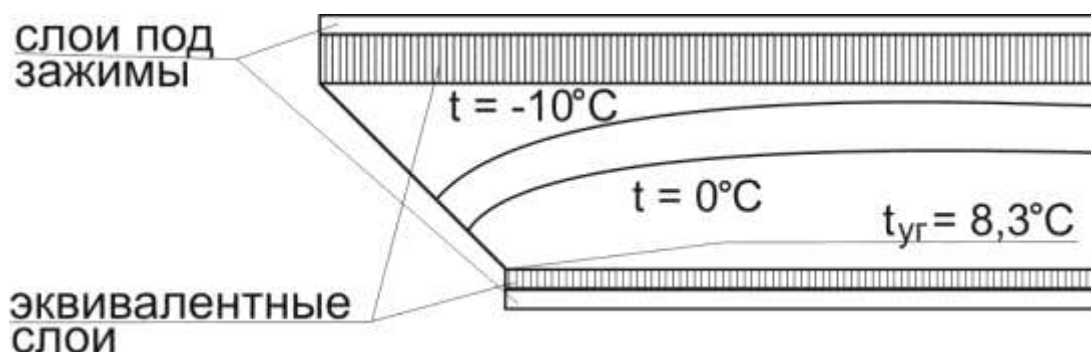


Рис. 3. Схема модели из токопроводящей бумаги сечения угла однородной наружной стены с нанесенными на нее изотермами 0°C и -10°C и указанием температуры на внутренней поверхности угла стены

4.1.9. Контрольные вопросы по лабораторной работе 4.1.

1. Что такое электротепловая аналогия?
2. Почему возможна электротепловая аналогия?
3. Какие прямые аналоги в тепловом и электрическом полях Вы знаете?
4. Какая величина в электрическом поле является аналогом коэффициента теплообмена на поверхности стенки?
5. С помощью каких двух групп электрических моделей осуществляется моделирование процессов теплопередачи?
6. Из какого материала выполняется электрическая модель в лабораторной работе №4.1?
7. Почему в электрической модели приходится прибегать к эквивалентным слоям, отсутствующим в реальной стенке?
8. Зачем в модели эквивалентного слоя делаются надрезы перпендикулярно границе стенки?
9. Зачем при моделировании соблюдаются масштабные соотношения?
10. Чему равен масштаб температур при электротепловом моделировании?
11. Чему равен масштаб длин при электротепловом моделировании?
12. Начертите схему примененной в лабораторной работе №4.1. установки для электротеплового моделирования?
13. Какими электрическими единицами пользовались в работе? Как изменятся изотермы, если подаваемое напряжение увеличить в два раза?

14. Начертите качественную картинку расположения изотерм $+5^{\circ}\text{C}$, -5°C , -15°C в сечении угла наружной стены при температуре помещения 20°C , а наружной -20°C .
15. В какой точке на внутренней поверхности сечения угла наружной стены температура минимальна? Почему?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 4.1.

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. – 3-е изд. – С-Пб.: изд-во «АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД», 2006. – 400 с.
2. Кувшинов Ю.Я. Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения. / Научное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 184 с.
3. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность / Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 296 с.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

4.2.1. Теплотехнические характеристики строительных материалов

Теплофизические характеристики – это комплекс показателей, характеризующих реакцию материала на процессы теплопроводности. К ним относятся: теплопроводность λ , объемная теплоемкость C_v , температуропроводность a , тепловая активность b , коэффициент теплоусвоения s [1].

Для решения теоретических и практических вопросов, связанных с теплопроводностью твердого тела, необходимо решить задачу нахождения температурного поля. Температурным полем называется совокупность мгновенных значений температуры во всех точках исследуемого объекта или распределение температуры во времени и в объеме.

Теплофизические характеристики материалов входят в основные уравнения теплопроводности. Теплопроводность λ является коэффициентом пропорциональности в дифференциальном уравнении стационарного температурного поля. Стационарное поле представляет собой распределение температуры, неизменное во времени. В этом случае плотность теплового потока q , Вт/м², через изотермическую поверхность (рис. 4.2.1) в соответствии с основным законом теплопроводности в стационарном состоянии при одномерном распространении теплоты – законом Фурье, равна:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dn} = -\lambda \text{grad}(t), \quad (4.2.1)$$

где

t – температура, $^{\circ}\text{C}$, изменяющаяся вдоль нормали к изотермической поверхности, через которую проходит тепловой поток плотностью q , Вт/м²;

n – текущая координата вдоль нормали к изотермической поверхности;

$\text{grad } t$ – градиент температуры, вектор, направленный в сторону возрастания температуры.

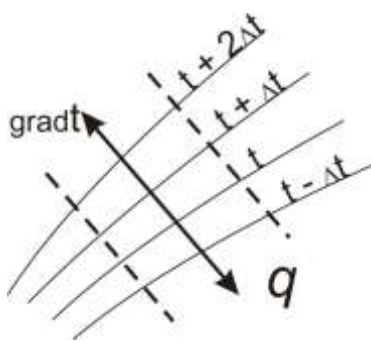


Рис.4.2.1 Направления теплового потока и градиента температуры.

_____ - изотермы; ----- - линии тока теплоты.

Физический смысл теплопроводности материала вытекает из уравнения (4.2.1). Теплопроводность материала λ , Вт/(м·К), равна тепловому потоку, проходящему в стационарном состоянии через единицу нормальной направлению потока поверхности материала при температурном градиенте внутри тела, равном единице температуры на единицу длины. Следовательно, λ характеризует степень проводимости теплоты веществом.

Для выяснения физического смысла других теплофизических характеристик материалов обозначим объемную концентрацию внутренней энергии тела через Q_v , Дж/м³, тогда градиент температуры можно выразить так:

$$\frac{dt}{dn} = \frac{\partial t}{\partial Q_v} \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial n} = \frac{1}{C_v} \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial n} \quad (4.2..2)$$

где

C_v – объемная теплоемкость материала, Дж/(м³·К), численно равная количеству теплоты, необходимой для нагревания или охлаждения единицы объема материала на 1°С.

Объемная теплоемкость связана с удельной теплоемкостью c , Дж/(кг·К), зависимостью

$$C_v = c\rho, \quad (4.2.3)$$

где

ρ – плотность вещества, кг/м³.

Удельная теплоемкость c равна количеству теплоты, которую надо сообщить единице массы материала, чтобы нагреть его на 1 °С. Уравнение основного закона теплопроводности Фурье (4.2.1) можно написать в виде

$$q = -\lambda \frac{1}{C_v} \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial n} = -a \frac{\partial Q_v}{\partial n}, \quad (4.2.4)$$

где

a – температуропроводность материала, м²/с,

$$a = \frac{\lambda}{C_v} = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (4.2..5)$$

Из (4.2.4) следует, что температуропроводность a равна плотности теплового потока при градиенте объемной концентрации внутренней энергии в 1

$\frac{\text{Дж} / \text{м}^3}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^4}$. Согласно (4.2.5) температуропроводность a равна повышению температуры, которое произойдет у единицы объема данного вещества, если ему передать количество теплоты, численно равное его теплопроводности λ , Вт/(м·К).

Большую роль играют теплофизические характеристики строительных материалов в нестационарных (переменных во времени) процессах теплопроводности, которые для одномерного теплового потока описываются следующим дифференциальным уравнением:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (4.2.6)$$

где

x – координата, по которой распространяется тепловой поток, м,

z – время, с.

При однородном материале с постоянной теплопроводностью в объеме выражение (4.2.6) можно переписать в виде:

$$C_v \frac{\partial t}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (4.2..7)$$

Правая часть уравнения (1.7) показывает изменение теплового потока по длине (дифференциал выражения dt/dx , сравните с уравнением (4.2..1)). Это изменение связано с поглощением или выделением теплоты веществом при изменении его температуры во времени, что отражено в левой части уравнения. Из (4.2.7) следует, что *объемная теплоемкость C_v характеризует интенсивность изменения температуры тела во времени при его нагревании или охлаждении*. Представление уравнения (4.2.7) в виде

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a \frac{\partial [\text{grad}(t)]}{\partial x}, \quad (4.2..8)$$

показывает, что *температуропроводность материала a характеризует скорость выравнивания температуры в различных точках тела*.

Значительное место в теплотехнике занимают задачи о нагревании и остывании тел. Известно, что если полуограниченный массив, все точки которого имеют одинаковую постоянную температуру t_0 , охлаждать, поддерживая с какого-то момента времени постоянную температуру t_c , то количество теплоты, Дж, проходящей через 1 м^2 поверхности этой границы в промежутке времени от начала охлаждения (нагревания) до z_1 равно

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\lambda c \rho} (t_0 - t_c) \sqrt{z_1}. \quad (4.2.9)$$

Таким образом, количество теплоты прямо пропорционально разности температуры ($t_0 - t_c$) и квадратному корню из промежутка времени z_1 . *Коэффициентом пропорциональности является величина, называемая тепловой активностью b , Дж/(м²К·с^{1/2}):*

$$b = \sqrt{\lambda C_v} = \sqrt{\lambda c \rho}. \quad (4.2.10)$$

Подобным образом количество теплоты, Дж, аккумулированной 1 м^2 полуограниченного тела при периодических колебаниях температуры поверхности за полупериод цикла равно

$$Q = 2A_t \sqrt{\lambda c \rho} \sqrt{\frac{T}{2\pi}}, \quad (4.2.11)$$

где

T – период колебаний температуры на границе полуограниченного массива, с;

A_t – амплитуда колебаний температуры, °С.

В этом случае Q также пропорционально тепловой активности материала b . Таким образом, *b является сложной характеристикой свойств аккумуляции теплоты при любых видах тепловых воздействий*. Чаще всего тепловая активность b применяется для характеристики скорости отвода теплоты от ноги человека при соприкосновении ее с полом помещения, то есть *b является характеристикой полов*.

Отношение амплитуд колебаний потока теплоты и температуры в тех же условиях периодических колебаний температуры на границе полуограниченного массива равно:

$$\frac{A_Q}{A_t} = s, \quad (4.2.12)$$

s называется коэффициентом теплоусвоения материала. Он характеризует способность материала воспринимать теплоту при колебаниях температуры на его поверхности. Величина коэффициента теплоусвоения материала s , Вт/м²·°С, зависит от теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности ρ , а также от периода колебания теплового потока T :

$$s = \sqrt{\frac{2\pi}{T} \lambda c \rho} . \quad (4.2.13)$$

Для суточного периода $T=24 \text{ ч}=86\,400 \text{ с}$,

$$s = 0,00853 \sqrt{\lambda c \rho} . \quad (4.2.14)$$

4.2.2. Методы определения теплофизических характеристик строительных материалов

Наиболее распространенными являются *методы*, основанные на создании в образце *стационарного теплового режима* [2], что объясняется их относительной простотой. Однако стационарные методы требуют длительного "вхождения в режим" и допускают исследования только в лабораторных условиях.

Нестационарные методы [2] характеризуются тем, что температурный режим в испытуемом образце изменяется со временем. Их можно разделить на *методы квазистационарные и чисто нестационарные*. К первой группе относятся, в частности, методы, основанные на принципах регулярного режима, классифицируемые как переходные между стационарными и нестационарными. Рассматривается охлаждение или нагревание в среде с постоянной температурой. Если образец имел сначала любое распределение температуры, то после погружения в среду с температурой $t_c = \text{const}$ все его точки будут стремиться с течением времени принять температуру t_c . Вначале на процесс теплообмена образца со средой влияют неоднородности и случайности, вызванные неравномерностью поля температуры в теле. Это – *начальная стадия чисто нестационарного режима*; с некоторого времени она переходит в *стадию упорядоченного охлаждения или нагревания*, которая названа *регулярным режимом*.

В стадии регулярного режима распределение температуры по различным точкам системы перестает зависеть от начального состояния. Для него характерно экспоненциальное распределение температуры во времени у всех точек материала.

Нестационарные, или иррегулярные методы определения теплофизических характеристик материалов, также имеют несколько модификаций, к ним в частности относятся *импульсные методы*.

Поскольку строительные материалы обычно представляют собой влажные капиллярно-пористые тела, определение их теплофизических характеристик является сложной метрологической задачей, так как в них осуществляется взаимосвязанный перенос теплоты и влаги, зачастую осложненный ее фазовыми превращениями. Поэтому при определении упомянутых выше характеристик необходимо либо расчетным путем оценивать влияние только кондуктивной составляющей потока теплоты, либо экспериментальным путем сводить к минимуму влияние влагопереноса и источников (стоков) теплоты. Иррегулярные методы исследования в силу целого ряда причин имеют преимущества перед остальными методами определения теплофизических характеристик влажных капиллярно-пористых тел. Достоинством нестационарных методов является возможность проведения быстрых измерений и наличие большей информации о тепловых свойствах исследуемых материалов, что позволяет расширить число способов измерений и, кроме того, в одном эксперименте определять несколько характеристик сразу.

4.2.3. Основы импульсного метода и его математическое моделирование

Метод основан на решении задачи теплопроводности при изменении избыточной температуры под воздействием мгновенного теплового импульса в центре источника теплоты, расположенного в плоскости соприкосновения двух полуограниченных тел (эталонного и исследуемого) [2,3].

Известно, что избыточная температура в центре импульсного источника, помещенного между полубесконечными телами из одинакового материала равна

$$\Delta t_n = \frac{q}{2b\sqrt{\pi z}}. \quad (4.2.15)$$

где q – плотность теплового потока, выделяемого источником, Вт/м²;

b – тепловая активность материала, Дж/м²·К·с^{1/2};

z – время, отсчет которого ведется от импульса, с.

В приборе же плоский импульсный источник радиусом r помещен между двух полубесконечных соприкасающихся тел – "эталонного" с известными теплофизическими характеристиками ($a_э$, $b_э$, $\lambda_э$, $C_{v,э}$ – с индексами «э») и исследуемого материала с неизвестными характеристиками (a_m , b_m , λ_m , $C_{v,m}$ – с индексами «м») (рис. 2).

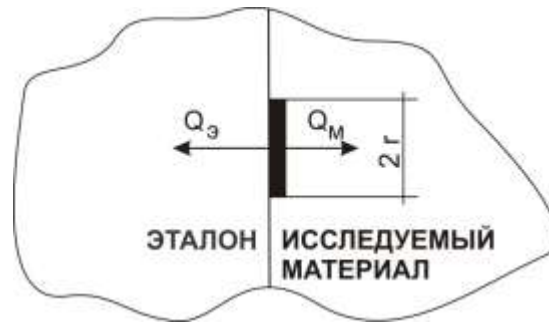


Рис.4.2.2 Система соприкасающихся полубесконечных тел: «эталон» и исследуемый материал

Источник выделяет тепловой поток плотностью q , Вт/м², распространяющийся в "эталон" $q_э$ и исследуемый материал q_m

$$q = q_э + q_m \quad (4.2.16)$$

По аналогии с (3.1) для "эталонного" и исследуемого материалов можно записать:

$$q_э = \Delta t_э b_э \sqrt{\pi z} \quad \text{и} \quad q_m = \Delta t_m b_m \sqrt{\pi z} \quad (4.2.17)$$

Если предположить, что в месте соприкосновения тел выполняются условия идеального теплового контакта, то есть значения избыточной температуры контактируемых поверхностей равны:

$$\Delta t_э = \Delta t_m = \Delta t, \quad (4.2.18)$$

то, подставив (3.3) в (3.2), получим

$$\Delta t = \frac{q}{(b_э + b_m)\sqrt{\pi z}}. \quad (4.2.19)$$

С учетом конечного радиуса r источника теплового импульса избыточная температура в его центре записывается как

$$\Delta t = \frac{q}{[b_э/(1 - e^{-r^2/4a_э z}) + b_m/(1 - e^{-r^2/4a_m z})]\sqrt{\pi z}}. \quad (4.2.20)$$

С помощью установки, начиная с подачи кратковременного теплового импульса, дискретно регистрируются изменения во времени избыточной температуры в центре нагревателя, находящегося между "эталонным" и исследуемыми материалами. Однако, данные регистрации прибором выдаются не в °С, а в единицах электрических величин, связанных с измерением температуры при помощи термопар. По данным регистрации снижения температуры в центре импульсного источника расчетом можно определить

значения a_m , b_m . Вывод формул для определения температуропроводности материала a_m и тепловой активности b_m приведен в Приложении. По этим значениям определяется основные теплофизические характеристики материала.

$$\lambda_m = b_m \sqrt{a_m}, \text{ и } C_{v,m} = \lambda_m / a_m, \quad c_m = C_{v,m} / \rho_m. \quad (4.2.21)$$

4. Установка для проведения экспериментов

Комплект установки [3] состоит из двух отдельных составляющих (рис. 4.2.3):

- первичного преобразователя ПП, служащего для прямого преобразования изменения температуры материала после теплового импульса в соответствующий электрический сигнал;
- интегратора цифрового автоматического ИО2 – вторичного измерительного прибора для регистрации прохождения во времени сигнала, поступающего с первичного преобразователя, обработки его и печати.

В корпус прибора ИО2 вмонтированы генератор тепловых импульсов – ГТИ, а также дискретизатор интегрирования. Первичный преобразователь представляет собой пенополистирольный цилиндр (эталонное тело) диаметром 140 мм и высотой 55 мм. В середине плоскости одного из его оснований заподлицо с ним расположен круглый диск из тонкого бронзового листа, служащий для передачи теплоты от нагревательного элемента к исследуемому образцу. К центру стороны диска, обращенной внутрь, прикреплен "горячий" спай термопары. "Холодный" спай термопары для лучшей теплоизоляции выведен к противоположному основанию и там утоплен на малую глубину в тело цилиндра, регистрируя практически постоянную во время эксперимента температуру в лаборатории. Вокруг "горячего" спая термопары расположен плоский, прилегающий к плоскости диска, нагреватель, представляющий собой спираль из константовой проволоки диаметром 0,2 мм, сопротивлением 10 Ом (электроизолированную от диска). Выводы нагревателя соединены проводами с генератором теплового импульса, расположенного внутри интегратора ИО2, а выводы термопары – экранированным проводом (для улучшения помехоустойчивости) – с входом интегратора ИО2.

4.2.5. Порядок работы с установкой

1. Перед экспериментом необходимо проверить положение переключателей на передней панели прибора, которые должны быть установлены:
 АНАЛОГОВЫЙ ФИЛЬТР – ВЫКЛ.,
 СКОРОСТЬ КОРРЕКЦИИ – 4,
 ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР – ВЫКЛ.,
 ТУМБЛЕР τ_r – 4 с (при теплопроводном материале с плотностью $\rho \geq 1400 \text{ кг/м}^3$ – 2 с).



Рис. 3 Схема лабораторной установки.

1 – эталонный материал; 2 – исследуемый материал; 3 – бронзовый лист,
 4 – спираль нагревателя, 5 – горячий спай термопары, 6 – холодный спай термопары.

Тумблеры на задней панели должны быть установлены в положения:

АВТ/РУЧН – РУЧН.,
 Бэ – вниз,

+/- в сторону предполагаемого сигнала контроль/работа – работа.

2. Нажать одновременно кнопки ПУСК и ИНТЕГРИРОВАНИЕ. При этом вступают в работу счетчики времени и площади. За их работой можно наблюдать на световом табло. Если положение тумблера +/- (сзади прибора) не соответствует направлению сигнала, на световом табло показаний счетчика площади не будет, необходимо

переключить тумблер. Следует иметь в виду, что знак сигнала прибора не регистрируется. Поэтому положение тумблера, при котором высвечиваются показания счетчика площади, надо запомнить.

3. Убедиться, что показания счетчика площади установились (неизменны). После этого можно начинать измерения:

- подать тумблер ПЕЧАТЬ вверх, отпечатать 4 – 5 строк;
- если тумблер +/- стоял на «-» перебросить его на «+»;
- нажать кнопку «ПУСК» для сброса показаний счетчика времени и следом отрывисто одновременно нажать кнопки ПУСК и ТЕПЛ.ИМП.
- убедиться по световому индикатору счетчика площади в прохождении теплового импульса (резко возросли показания счетчика площади);
- по достижении необходимого количества напечатанных строк (показание времени должны быть 150 – 180 с) тумблер ПЕЧАТЬ перебросить вниз.
- выбрать два значения показаний импульса в моменты времени так, чтобы позднее показание относилось ко времени в 2 раза превышающем время первого показания. Зафиксировать нулевое значение электрического сигнала до начала импульса.
- обработать результаты по приведенным в разделе 3 и в Приложении 1 формулам, заложенным в программу на ЭВМ, представленную на языке Фортран 77 в Приложении 2.

4.2.6. Пример получения результатов исследования и обработки полученных данных

Исследуется образец пенопласта плотностью 115 кг/м³. После измерения на приборе получена распечатка:

159	376
155	384
151	394
147	404
143	412
139	422
135	434
131	444
127	458
123	468
119	480
115	494
111	508
107	522
103	538
99	554
95	572
91	590
87	610
83	630
79	652
75	676
71	700
67	728
63	758
59	790
55	826
51	862

47	908
43	954
39	1006
35	1070
31	1138
27	1222
23	1320
19	1444
15	1602
11	1818
7	856
3	6
1361	90
1357	90
1353	90
1349	92
1345	90

Из полученной ленты результатов определяем нулевое значение электрического сигнала до начала импульса $x_0=90$. Принимаем первое значение времени $z_1=63$ с, тогда второй момент времени $z_2=126$ с. Показания электрических сигналов в эти моменты времени равны: $x_{11}=758$, $x_{22}=453$. Эти данные заносим в исходный файл labor2.res. Выполняем расчет по программе Labor2.for. В файл исходных данных записываются результаты:

```

x0, x11, x22, z1, z2  90.0 758.0 463.0 63.0 126.0
исходные данные      90.0 758.0 463.0 63.0 126.0
Теплофизические характеристики материала:
теплопроводность      .06494639 Вт/(м·К)
температуропроводность .00000044 м2/с
тепловая активность   97.41959000 Дж/(м2·К·с1/2)
объемная теплоемкость 146.12940000 кДж/(м3·К)
коэффициент теплоусвоения .83076720 Вт/(м2·К)

```

Полученные результаты хорошо согласуются с данными [4] для пенопласта ПХВ-1 и ПВ1.

4.2.7. Вопросы для самопроверки по лабораторной работе 4.2.

1. Что такое нестационарное температурное поле?
2. Что понимается под "теплофизическими характеристиками строительных материалов".
3. Что такое коэффициент теплопроводности материала?
4. Что такое коэффициент температуропроводности материала?
5. Что характеризует коэффициент тепловой активности материала?
6. Что характеризует объемная теплоемкость материала?
7. Что такое коэффициент теплоусвоения материала?
8. Какие группы методов теплофизических характеристик строительных материалов Вы знаете?
9. Перечислите основные достоинства и недостатки стационарных методов определения теплофизических характеристик строительных материалов.
10. Перечислите основные достоинства и недостатки нестационарных (начальной стадии теплообмена) методов определения теплофизических характеристик строительных материалов.
11. Начертите схему примененной в лабораторной работе №2 установки для определения теплофизических характеристик материалов импульсным методом.

12. На чем основан импульсный метод определения теплофизических характеристик строительных материалов?
13. При исследовании более или менее теплопроводного материала показания электрического сигнала со временем будут уменьшаться быстрее?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 4.2.

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. – 3-е изд. – С-Пб.: Изд-во «АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД», 2006. – 400 с.
2. Рекомендации по комплексному определению теплофизических характеристик строительных материалов. / НИИСФ. – М.: Стройиздат, 1987. – 30 с.
3. Установка и методика для экспрессного определения теплопроводности материалов строительных изделий и конструкций. / Отчет о научно-исследовательской работе. НИИСФ. – М.: 1992. – 16 с.
4. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004.