

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

621.036(07)  
П167

В.И. Панферов

# ТЕПЛОМАССООБМЕН

Учебное пособие к лабораторным работам

Челябинск  
Издательство ЮУрГУ  
2005

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И СОСТАВЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Все студенты, пришедшие в лабораторию, обязаны ознакомиться с правилами по технике безопасности и строго их выполнять. Студенты, нарушившие эти правила, удаляются из лаборатории.
2. Для выполнения лабораторных работ студенческая группа делится на бригады по 2-3 человека в каждой.
3. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, бригада обязана ознакомиться с ее содержанием. Следует повторить или изучить теоретический материал, относящийся к работе, уяснить цель и задачу работы.
4. Схема установки, таблицы для записи наблюдений, необходимые расчетные формулы заносятся в тетрадь для предварительных записей и перед выполнением работы представляются руководителю для просмотра; одновременно руководитель проводит собеседование по данной работе. Студенты, не подготовившиеся к выполнению лабораторной работы, не допускаются к ее выполнению.
5. Приступая к работе, надо расположить на стенде измерительную аппаратуру так, чтобы схема была наиболее простой и наглядной. Когда схема собрана, необходимо проверить надежность присоединения всех контактов, проверить нулевые положения стрелок на шкалах приборов и лишь после разрешения руководителя включить установку в работу.
6. Во время измерений необходимо очень тщательно производить отсчеты по приборам и немедленно, без всяких пересчетов, записывать показания приборов в заранее подготовленную графу таблицы.
7. Студентам воспрещается разрезать проводники, вскрывать приборы или переносить их с одного стенда на другой без разрешения руководителя.
8. В случае повреждения прибора студенты обязаны немедленно сообщить об этом руководителю или лаборанту.
9. По окончании опыта производятся необходимые расчеты, вручную строятся графики, затем опытные данные и результаты вычислений представляются руководителю. После проверки расчетов работа считается принятой руководителем.
  - а) наименование работы;
  - б) перечень аппаратуры и ее технические данные;
  - в) краткое описание работы;
  - г) схему установки;
  - д) таблицы с опытными и расчетными данными;
  - е) формулы, а также необходимые расчеты;
  - ж) необходимые графики с обязательным указанием единиц измерения, под графиками дается наименование построенных кривых, при этом на кривых указываются точки, полученные в результате эксперимента или расчета;
10. По полученным данным к следующему занятию в тетради для лабораторных работ оформляется отчет по работе. Отчет выполняется шариковой ручкой аккуратно. Отчет должен содержать:

УДК 621.036.2(076.5) + 536.24(076.5)

Панферов В.И. Теплообмен: Учебное пособие к лабораторным работам. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 35 с.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 270109 – «Теплогоснабжение и вентиляция». Приведены методика проведения лабораторных работ, схемы и описание экспериментальных стендов, порядок обработки и оформления результатов измерений.

Ил. 9, табл. 6, список лит. – 4 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией архитектурно-строительного факультета.

Рецензенты: Р.Н. Шумилов, С.В. Давыдов.

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПЛИТЫ

#### Цель работы

Изучение метода плиты, применяемого для экспериментального определения коэффициента теплопроводности строительных материалов.

#### Теоретические сведения

Для определения данным методом коэффициента теплопроводности образца исследуемого материала, имеющего форму плиты с известной толщиной  $\delta$ , нужно произвести измерение плотности теплового потока  $q$  и разности температур поверхностей образца  $\Delta t$  в установившемся режиме. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  находят по конечно-разностной форме закона Фурье:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta} \Rightarrow \lambda = q \cdot \delta / \Delta t.$$

При проведении эксперимента необходимо, чтобы в исследуемом образце был бы создан одномерный поток тепла. Кроме того, должно быть обеспечено строгое постоянство величины теплового потока в период опыта. Выполнение этих условий зависит от формы и геометрических размеров исследуемых образцов и от продолжительности эксперимента. Начало измерений возможно только после установления строго стационарного режима теплопередачи. Последнее обстоятельство обуславливает относительно большую длительность испытаний: практически не менее 3—4 часов.

#### Описание установки

Экспериментальная установка имеет стабилизированный источник напряжения постоянного тока в 5 В с нагрузочной способностью по току до 20 А, теплоизмерительную ячейку, потенциометр типа ПП-63 и мультиметр. Теплоизмерительная ячейка изготовлена по симметричной схеме, в центре размещен электрический нагреватель, к двум изотермическим оболочкам, которого достаточно плотно прилегают два одинаковых исследуемых образца, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, с размерами лицевых (рабочих) граней 160·160 мм и толщиной образцов, не превышающей 20 мм. Снаружи симметричной сборки из указанных элементов располагаются два одинаковых воздушных холодильника (радиатора), изготовленных так, как это делают для охлаждения электронных устройств. Вся сборка элементов располагается вертикально в окружающей среде и

3) выводы по работе.

11. Студенты, не представившие счета по предыдущей работе, не допускаются к выполнению следующих лабораторных работ.

12. В лаборатории запрещается находиться у чужих стенов, производить какие-либо не предусмотренные выполняемой лабораторной работой переключки электрооборудования.

13. В лаборатории запрещается курить, шуметь, громко разговаривать, находиться в верхней одежде.

удерживается в этом положении с помощью штагива с опорами, позволяющими разместить  $\lambda$ -метр на обычном письменном столе. При этом необходимо к тактовое давление создается с помощью винтов, прижимающих холодильники к остальным элементам. Так как холодильники изготовлены из алюминия, то вследствие его высокого коэффициента теплопроводности прижимные винты не будут искажать равномерное температурное поле на гладких поверхностях холодильников.

Нагреватель изготовлен из двух пластин стеклотекстолита, причем, одна из пластин покрыта фольгой с обеих сторон, а другая — только с одной стороны. На одной из сторон первой пластины выполняется лабиринтный нагреватель (рис.1), затем эта пластина нагревателем накладывается на нефольгированную поверхность другой пластины, после чего пластины жестко закрепляются заклепками. Стеклотекстолит выполняет функцию электрического изолятора, а обращенная наружу его фольгированная поверхность вследствие своего высокого коэффициента теплопроводности создает равномерное (изотермическое) температурное поле. Фольга является изотермической оболочкой нагревателя.

Для измерения температур поверхности образцов используются четыре хромель-копелевые термомпары. При этом одну пару термомпар протянули с внешней (оробренной) поверхности радиаторов до их центра, просверлили в центре радиаторов отверстия для термомпар и заполнили с гладкой поверхностью радиаторов разместили горячие спай термомпар. Другая пара термомпар должна измерять температуру изотермических поверхностей нагревателя. Для этого термомпары протянули до центра со стороны собственно электрического нагревателя и вывели их спай на изотермические поверхности. При этом в центре лабиринтной модели нагревателя для формирования дорожки для укладки термомпар расстояние между соседними «зигзагами» ленточного нагревателя делается специально большим. Размещение термомпар внутри нагревателя (со стороны собственно нагревателя) имеет то достоинство, что в этом случае температурное поле нагревателя обязательно выравнивается изотермическими оболочками. Конструкция теплоизмерительной ячейки и блока питания лабораторного стенда приведена на рис. 2.

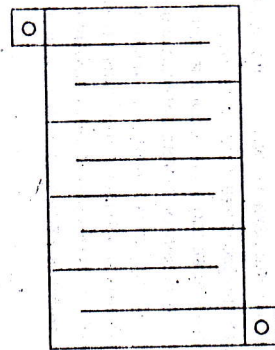


Рис.1. Лабиринтный нагреватель

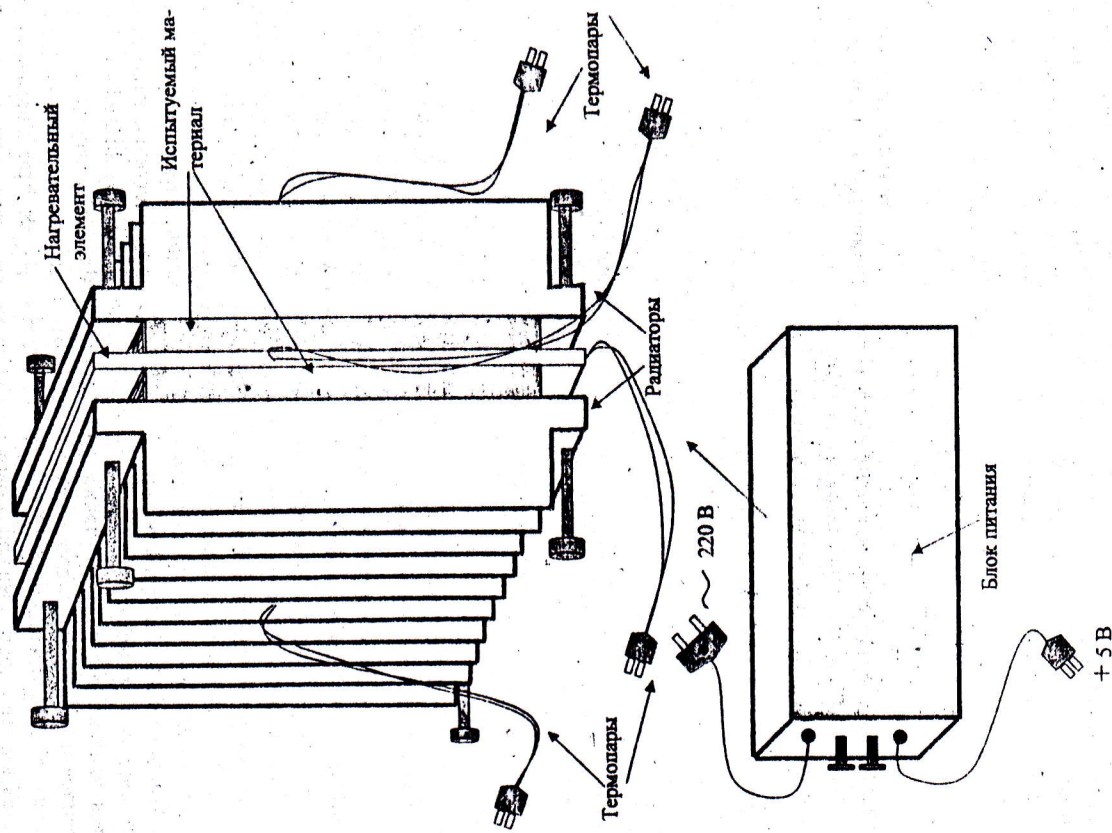


Рис.2. Теплоизмерительная ячейка и блок питания лабораторного стенда

### Порядок выполнения лабораторной работы

Для достижения стационарного теплового режима блок питания установки включается в сеть за 3-4 часа до начала занятий. Выполнение работы заключается в 2-3-кратном измерении температур поверхностей образцов с помощью хромель-копелевых термопар (при измерении температуры следует вводить поправку на температуру холодных концов термопар) и потенциометра ПП-63, определение плотности теплового потока производится по результатам измерения потребляемой нагревателем мощности. Для этого используется мультиметр, включенный своими токовым и потенциальным входами соответственно последовательно и параллельно нагревателю. Включая поочередно мультиметр в режимы измерения тока и напряжения, определяют ток нагревателя  $I$  и напряжение на нем  $U$ , перемножив эти величины, находят мощность нагревателя  $W = U \cdot I$ . Поделив мощность  $W$  на суммарную площадь  $F$  поверхностей образцов, контактирующих с нагревателем, определяют плотность теплового потока:  $q = W/F$ . (Здесь  $F = 2 \cdot 160 \cdot 160 \text{ мм}^2$ ). Толщину исследуемых образцов  $\delta$  измеряют до их установки в теплоизмерительную ячейку. Результаты измерений записывают в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№ п/п	Толщина образцов $\delta$ , м	Мощность нагревателя $W$ , Вт	Показания термопар			
			1 мВ	2 мВ	3 мВ	4 мВ
			°C	°C	°C	°C

Перевод термо-э.д.с. термопар в градусы Цельсия производится с помощью данных табл. 2.

Так как температурное поле в образцах нельзя считать идеально одномерным, то в формулу для вычисления коэффициента теплопроводности  $\lambda$  вводится поправочный коэффициент  $\epsilon$ , и в окончательном виде эта формула запишется следующим образом:

$$\lambda = q \cdot \delta / (\Delta t \cdot \epsilon),$$

где  $\epsilon = 1,05768 + 0,225576 / \Delta t$ .

В идеальных условиях температурные перепады  $\Delta t$  для одинаковых образцов должны быть равными. Однако, как правило, значения  $\Delta t$  для образцов не совпадают. В этом случае производится определение коэффициента теплопроводности для каждого образца в отдельности, а затем вычисляется его среднее значение.

Номинальная статическая характеристика преобразования для хромель-копелевой термопары (ХК) при температуре свободных концов в °C

Температура рабочего конца, °C	Термо-э.д.с., мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,06	0,12	0,19	0,25	0,31	0,38	0,44	0,50	0,57
10	0,63	0,70	0,76	0,83	0,89	0,96	1,02	1,09	1,15	1,22
20	1,28	1,35	1,41	1,48	1,55	1,61	1,68	1,74	1,81	1,88
30	1,94	2,01	2,08	2,14	2,21	2,28	2,34	2,41	2,48	2,55
40	2,61	2,68	2,75	2,82	2,88	2,95	3,02	3,09	3,16	3,23
50	3,29	3,36	3,43	3,50	3,57	3,64	3,71	3,78	3,85	3,92
60	3,98	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,40	4,47	4,54	4,61
70	4,68	4,76	4,83	4,90	4,97	5,04	5,11	5,18	5,25	5,32
80	5,39	5,46	5,54	5,61	5,68	5,76	5,82	5,89	5,97	6,04
90	6,11	6,18	6,26	6,33	6,40	6,47	6,55	6,62	6,69	6,76
100	6,84	6,91	6,98	7,06	7,13	7,20	7,28	7,35	7,42	7,50
110	7,57	7,65	7,72	7,79	7,87	7,94	8,02	8,09	8,16	8,24
120	8,31	8,39	8,46	8,54	8,61	8,69	8,76	8,84	8,91	8,99
130	9,06	9,14	9,22	9,29	9,37	9,44	9,52	9,59	9,67	9,75
140	9,82	9,90	9,97	10,0	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,5
150	10,5	10,6	10,7	10,8	10,8	10,9	11,0	11,1	11,2	11,2
160	11,3	11,4	11,5	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9	11,9	12,0
170	12,1	12,2	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,6	12,7	12,8
180	12,9	13,0	13,0	13,1	13,2	13,3	13,4	13,4	13,5	13,6
190	13,7	13,8	13,8	13,9	14,0	14,1	14,1	14,2	14,3	14,4
200	14,5	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2
210	15,3	15,4	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,8	15,9	16,0
220	16,1	16,2	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,7	16,8
230	16,9	17,0	17,1	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,6
240	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5
250	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0	19,0	19,1	19,2	19,3
260	19,4	19,5	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,1	20,1
270	20,2	20,3	20,4	20,5	20,6	20,6	20,7	20,8	20,9	21,0
280	21,1	21,1	21,2	21,3	21,4	21,5	21,6	21,7	21,7	21,8
290	21,9	22,0	22,1	22,2	22,2	22,3	22,4	22,5	22,6	22,7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТРУБЫ

### Цель работы

Изучение метода трубы, применяемого для экспериментального определения коэффициента теплопроводности строительных материалов.

### Теоретические сведения

Метод трубы обычно рекомендуют применять для определения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  только теплоизоляционных материалов, т.е. материалов, коэффициент теплопроводности которых не превышает значения  $0,25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{С)}$ . Для материалов, имеющих большее значение  $\lambda$ , данный метод, как правило, неприемлем, так как он не обеспечивает требуемую точность.

Метод трубы заключается в следующем. Пусть на внутренней поверхности цилиндрической стенки поддерживается температура  $t_1$ , а на внешней — температура  $t_2$ , пусть, кроме того  $t_1 > t_2$ . Если температурное поле по длине трубы является достаточно равномерным, а во времени установившемся, то коэффициент теплопроводности  $\lambda$  материала, из которого изготовлена труба, можно определить по следующей формуле:

$$\lambda = Q \ln(d_2 / d_1) / [2\pi l (t_1 - t_2)],$$

где  $Q$  — количество тепла, которое передается в единицу времени от внутренней поверхности цилиндрической стенки к ее наружной поверхности,  $d_1, d_2, l$  — соответственно внутренний, внешний диаметры трубы и ее длина.

Температуры  $t_1$  и  $t_2$  будут постоянны вдоль трубы только при бесконечной ее длине. Однако любая экспериментальная труба имеет конечную длину  $l$  и отдает тепло в окружающую среду не только через боковые поверхности, но и через торцы. Поэтому температура на внутренней поверхности трубы конечной длины уменьшается к торцам. Температура на внешней поверхности  $t_2$ , как показывает исследование, практически одинакова по длине трубы, она изменяется лишь по окружности за счет изменения локального коэффициента теплоотдачи. Вследствие этого в вышеприведенную формулу для определения  $\lambda$  вводятся поправки: вместо измеренных температур  $t_1$  и  $t_2$  используются их расчетные значения. Расчетные значения вычисляются по опытным данным, они представляются собой те температуры, которые имели бы поверхности трубы в идеальных условиях.

### Описание установки

На медную трубу (рис. 3) наружным диаметром  $d_1 = 12 \text{ мм}$  и длиной  $l = 1,0 \text{ м}$  нанесен слой исследуемого изоляционного материала (вспученный вермикулит) с внешним диаметром  $d_2 = 88 \text{ мм}$ . Внешняя поверхность изоляционного материала помещена в защитную металлическую трубу. Внутри медной трубы намотана нихромовая спираль, по которой пропускается электрический ток, служащий источником тепла. Регулирование напряжения на нагревателе производится с помощью лабораторного автотрансформатора. Для измерения мощности нагревателя используется ваттметр. Температуры внутренней и наружной поверхностей изоляционного материала измеряются с помощью хромель-копелевых термомпар и потенциометра ПП-63. Потенциометр ПП-63 подключается к термомпарам через специальный переключатель.

### Порядок выполнения лабораторной работы

Измерение температуры поверхностей изоляционного материала следует производить с учетом следующих обстоятельств. Термомпары, как правило, градуируются при температуре холодных спаев в  $0^\circ\text{С}$ , при измерениях в реальных условиях температура холодных концов обычно отличается от  $0^\circ\text{С}$ , поэтому для определения действительной температуры горячего спаев необходимо вводить поправку в сигнал термомпары, т.е. привести ее показания к тем условиям, которые имели место при градуировке. Поправка вводится по следующей формуле:  $E(t, 0) = E(t, t'_0) + E(t'_0, 0)$ . Здесь  $E(t, 0)$  — показания термомпары в градуировочных условиях,  $E(t, t'_0)$  — показания термомпары в реальных условиях, когда ее рабочие концы имеют температуру  $t$ , а свободные концы — температуру  $t'_0$ ,  $E(t'_0, 0)$  — поправка, определяемая по градуировочной характеристике термомпары.

Если  $t'_0$  постоянна, то поправку можно ввести вручную. Для этого следует с помощью жидкостного термометра расширения измерить температуру  $t'_0$  (температуру в лаборатории), далее, используя градуировочную таблицу для хромель-копелевых термомпар, по температуре  $t'_0$  определить  $E(t'_0, 0)$  и сложить полученное значение с показаниями ПП-63. После этого по величине  $E(t, 0)$  следует определить действительные температуры в местах размещения горячих спаев термомпар.

Отсчеты показаний приборов следует производить в установившемся режиме не менее 3 раз с интервалом 5–10 минут. Результаты измерений заносятся в табл. 3. Здесь  $Q$  определяется по показаниям ваттметра.

Результаты эксперимента

Номер отсчета	$t_1$		$t_1'$		$t_2$		$t_2'$		$Q$ , Вт
	мВ	$^{\circ}\text{C}$	мВ	$^{\circ}\text{C}$	мВ	$^{\circ}\text{C}$	мВ	$^{\circ}\text{C}$	
1									
2									
3									
Среднее									

Расчетное значение  $t_1$  определяется следующим образом:

$$t_1 = t_1' + [t_1' - (t_1' + t_1'')/2] / \text{ch}(x\sqrt{c}),$$

где  $\text{ch}(x\sqrt{c}) = [\exp(x\sqrt{c}) + \exp(-x\sqrt{c})] / 2$  – гиперболический косинус,  $c = 8[\ln(d_2/d_1) \cdot (d_2^2 - d_1^2)]$ , значение  $x = 0,25$  м.

Расчетное значение  $t_2$  вычисляется по формуле

$$t_2 = (t_2' + t_2'') / 3.$$

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КАЧЕСТВ НАРУЖНОЙ СТЕНЫ

Цель работы

Изучение методов определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

Теоретические сведения

Основной физической величиной, характеризующей теплозащитные качества наружных ограждающих конструкций зданий, является их термическое сопротивление теплопередаче. Расчетное значение термического сопротивления теплопередаче многослойного ограждения  $R_0^p$  определяется по формуле

$$R_0^p = 1 / \alpha_B + 1 / \alpha_H + \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i,$$

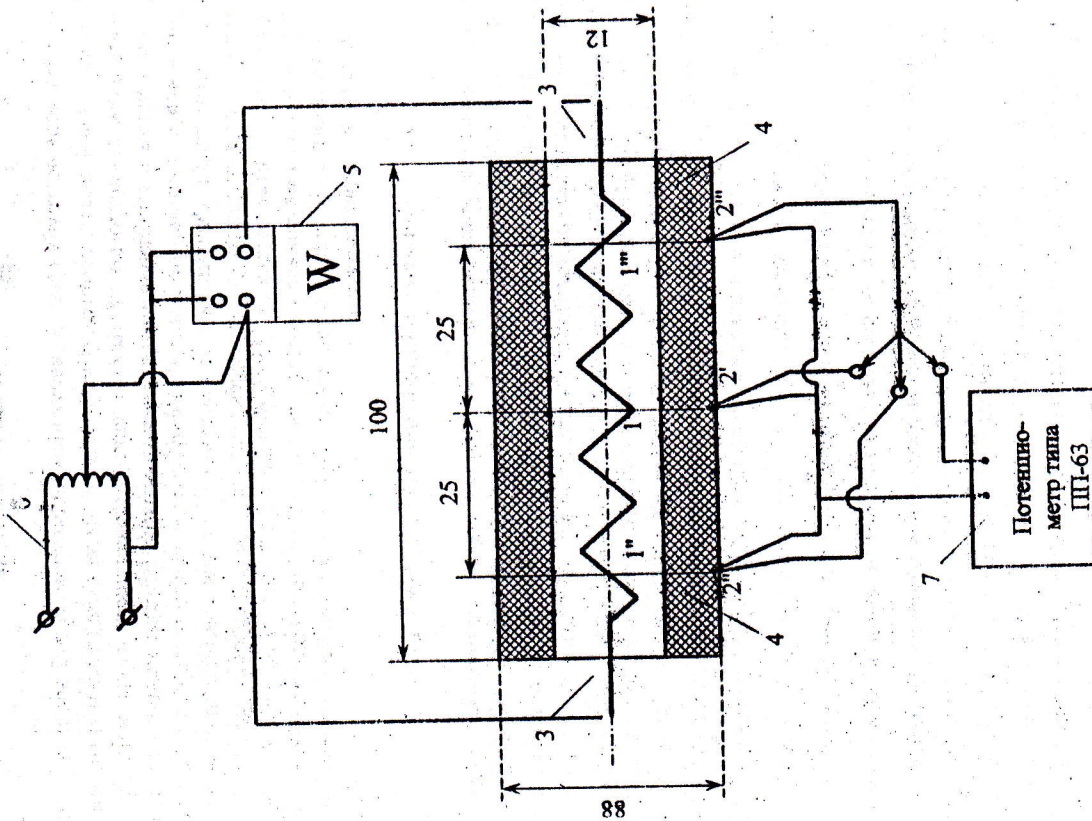


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1, 1' – терморпары на внутренней поверхности исследуемого образца; 2, 2' – терморпары на внешней поверхности исследуемого образца; 3 – электронагреватель; 4 – испытываемый изоляционный материал; 5 – ваттметр; 6 – лабораторный автотрансформатор; 7 – потенциометр типа ПП-63

где  $R_B = 1/\alpha_B$  – термического сопротивления теплодаче от воздуха помещения к поверхности стены,  $\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i$  – термического сопротивления теплопроводности и слоев ограждающей конструкции,  $R_H = 1/\alpha_H$  – термического сопротивления теплодаче для наружной поверхности ограждения,  $\alpha_B$  и  $\alpha_H$  – коэффициенты теплодаче соответственно для внутренней и наружной поверхности стены,  $\delta_i$  и  $\lambda_i$  – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя ограждающей конструкции. Величины  $\alpha_H$  и  $\lambda_i$  следует принимать по СП 23-101-2004, а  $\alpha_B$  – по СНиП 23-02.

Сопротивление теплопередаче можно определить экспериментальным способом, для этого следует измерить температуру внутреннего  $t_B$  и наружного  $t_H$  воздуха и плотность теплового потока через ограждение –  $q$ .

Экспериментальное значение  $R_0^3$  вычисляется по формуле

$$R_0^3 = (t_B - t_H) / q.$$

Измерение плотности теплового потока  $q$  производится с помощью дискового тепломера, плотно приклеенного к внутренней поверхности стены и работающего по методу дополнительной стенки. Существо метода состоит в том, что к поверхности, тепловой поток через которую необходимо определить, плотно прижимается дополнительная стенка с известной величиной термического сопротивления теплопроводности. Тогда, измеряя перепад температуры по толщине этой дополнительной стенки  $\Delta t$ , плотность теплового потока  $q$  находят по конечно-разностной форме закона Фурье:  $q = \lambda_{ДС} \cdot \frac{\Delta t}{\delta_{ДС}}$ , где  $\lambda_{ДС}$  – коэффициент теплопроводности, а  $\delta_{ДС}$  – толщина дополнительной стенки.

#### Описание установки

Объектом исследования является кирпичная стена из обыкновенного глиняного обожженного кирпича с плотностью  $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$ . Кладка сплошная, общая ее толщина 380 мм, слой внутренней штукатурки на сложном растворе имеет толщину в 20 мм. На поверхностях и в толще стены (как показано на рис.4) смонтирован комплект хромель-копелевых термопар. Термопары подключаются к потенциометру типа ПП-63 с помощью многополюсного переключателя. К внутренней поверхности штукатурки плотно приклеен тепломер. Тепломер представляет собой плоский диск из резины с смонтирован-

ной батареей дифференциальных термопар, предназначенной для измерения перепада температуры по толщине диска. Определение плотности теплового потока  $q$  следует производить по градуировочной характеристике тепломера, которая описывается формулой

$$q = C \cdot E,$$

где  $E$  – термо-э.д.с. батареи дифференциальных термопар, мВ,  $C$  – постоянная тепломера, определяемая путем предварительной градуировки, в данном случае  $C = 2,66 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мВ)}$ .

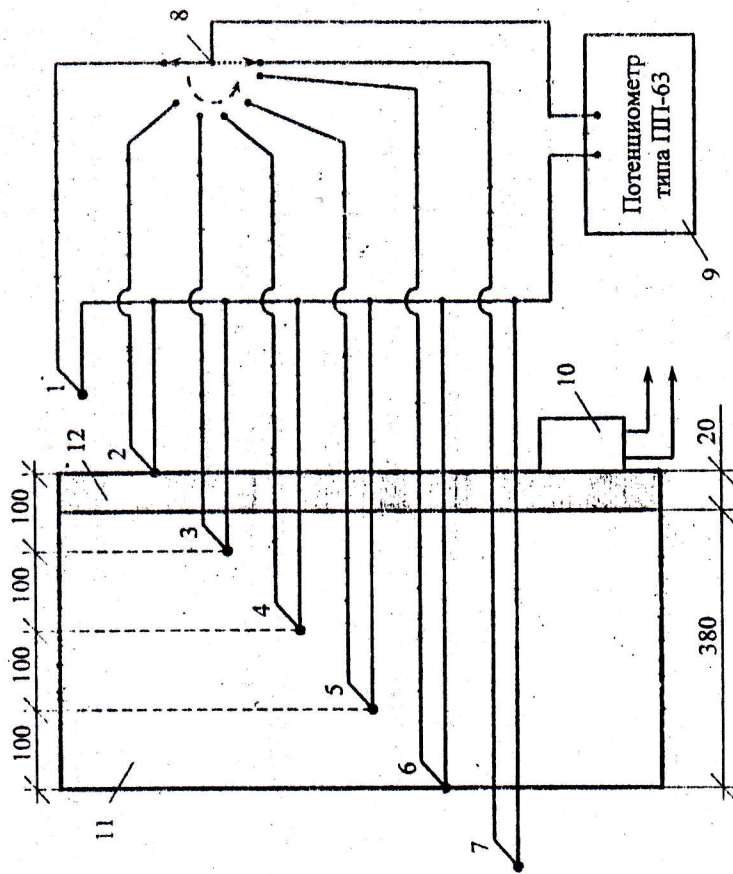


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – 7 – термопары; 8 – переключатель; 9 – потенциометр; 10 – тепломер; 11 – наружная кирпичная стена; 12 – слой внутренней штукатурки



### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Измеряют температуру наружного и внутреннего воздуха, а также плотность теплового потока, проходящего через стену. При этом отсчет показаний производят три раза с интервалом между последовательными отсчетами не менее 5 мин. Далее, используя градуировочные зависимости для хромель-копелевых термомпар и тепломера, осуществляют перевод показаний соответственно в  $^{\circ}\text{C}$  и  $\text{Вт}/\text{м}^2$  и вычисляют средние арифметические значения величин.

Примечание: при измерении температур внутреннего и наружного воздуха следует вводить поправки на температуры свободных концов термомпар. Процедура введения поправок изложена в лабораторной работе № 2.

2. Определяют расчетное и экспериментальное сопротивления теплопередаче и сравнивают их между собой.

3. Оформляют отчет по выполненной работе. Отчет должен содержать схему экспериментальной установки, краткое описание работы, записи показаний измерительных приборов, обработку результатов опыта и их анализ.

### Лабораторная работа № 4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОКНА СО СПАРЕННЫМИ ПЕРЕПЛЕТАМИ И ДВОЙНЫМ ОСТЕКЛЕНИЕМ

### Цель работы

Изучение методов определения теплозащитных свойств световых проемов.

### Теоретические сведения

Расчетное значение термического сопротивления теплопередаче окна  $R_{0K}^p$  определяется по формуле

$$R_{0K}^p = 1/\alpha_B + 1/\alpha_H + \sum_{i=1}^2 \delta_i / \lambda_i + R_{B.л.}$$

где  $R_B = 1/\alpha_B$  – термического сопротивления теплопередаче от воздуха помещения к поверхности внутреннего стекла,  $R_H = 1/\alpha_H$  – термического сопротивления теплопередаче для наружной поверхности наружного стекла,  $\sum_{i=1}^2 \delta_i / \lambda_i$  – термическое сопротивление теплопроводности 2-х стекол,  $\delta_i$  и  $\lambda_i$  – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности  $i$ -го стекла,  $R_{B.л.}$  – термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки,  $\alpha_B$  и  $\alpha_H$  – коэффициен-

ты теплоотдачи соответственно для внутренней и наружной поверхностей. Величины  $\alpha_H$ ,  $\lambda_i$  и  $R_{B.л.}$  следует принимать по СП 23-101-2004, а  $\alpha_B$  – по СНиП 23-02.

Сопроотивление теплопередаче окна можно определить и экспериментальным способом, для этого следует измерить температуру внутреннего  $t_B$  и наружного  $t_H$  воздуха и плотность теплового потока через окно  $q$ .

Экспериментальное значение  $R_{0K}^3$  вычисляется по формуле

$$R_{0K}^3 = (t_B - t_H) / q.$$

Измерение плотности теплового потока  $q$  производится с помощью тепломера, плотно приклеенного к внутренней поверхности внутреннего стекла.

### Описание установки

Объектом исследования является окно со спаренным переплетом и двойным остеклением (рис. 5). Толщина стекол – 3 мм. Расстояние между стеклами – 40 мм. Для измерения температуры внутреннего и наружного воздуха используются хромель-копелевые термомпары, подключаемые с помощью многополюсного переключателя к переносному потенциометру типа ПП-63. Перевод термо-э.д.с. термомпар в градусы Цельсия производится по градуировочной таблице (см. лабораторную работу № 1).

Для измерения теплового потока применяется тепломер, плотно приклеенный к внутренней поверхности остекления. Определение плотности теплового потока следует производить по градуировочной характеристике тепломера, которая описывается формулой

$$q = C \cdot E,$$

где  $E$  – выходной сигнал тепломера, мВ,  $C$  – постоянная тепломера, определяемая путем предварительной градуировки, для данного тепломера  $C = 104,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ .

### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Измеряют температуру наружного и внутреннего воздуха, а также плотность теплового потока, проходящего через стену. При этом отсчет показаний производят три раза с интервалом между последовательными отсчетами не менее 5 мин. Далее, используя градуировочные зависимости для хромель-копелевых термомпар и тепломера, осуществляют перевод показаний соответственно в  $^{\circ}\text{C}$  и  $\text{Вт}/\text{м}^2$  и вычисляют средние арифметические значения величин.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

### Цель работы

Изучение способа определения коэффициента температуропроводности твердых тел методом регулярного теплового режима.

### Теоретические сведения

Любой процесс нагрева или охлаждения тела можно разделить на три стадии. Первая стадия характеризуется тем, что текущее температурное поле очень сильно зависит от распределения температуры в начальный момент времени, в этот период скорость изменения температуры во времени (как абсолютная, так и относительная) различна для различных точек тела. Этот период называют иррегулярной (неупорядоченной) стадией.

С течением времени влияние начальных условий ослабевает, «упорядоченность» процесса возрастает, а относительная скорость изменения температуры во времени во всех точках тела становится постоянной величиной. Наступает второй период, который называется периодом регулярного теплового режима.

По прошествии длительного времени (теоретически по истечении бесконечно большого времени) наступает третий – стационарный режим, в этом режиме распределение температур в теле не изменяется во времени.

Теория регулярного теплового режима достаточно детально разработана профессором Г.М. Кондратьевым. Им же предложено использовать ряд закономерностей регулярного теплового режима для решения практических задач, в частности, для определения коэффициента температуропроводности материалов.

Известно, что охлаждение тела произвольной геометрической формы в среде постоянной температурой после наступления регулярного теплового режима достаточно точно описывается следующим уравнением:

$$\ln[t(M, \tau) - t_c] = -m\tau + f(M), \quad (1)$$

где  $t(M, \tau)$  – температура тела в точке  $M$  в момент времени  $\tau$ ,  $t_c$  – температура окружающей среды,  $m$  – некоторый постоянный коэффициент, называемый темпом охлаждения (нагрева),  $f(M)$  – некоторая функция координат точки  $M$  охлаждаемого тела.

Анализ данного уравнения показывает, что процесс охлаждения тела в среде с постоянной температурой после наступления регулярного теплового режима в координатах « $\ln[t(M, \tau) - t_c]$  –  $\tau$ » будет изображаться прямой линией. Для

Примечание: при измерении температур внутреннего и наружного воздуха следует вводить поправки на температуры свободных концов термомпар. Процедура введения поправок изложена в лабораторной работе № 2.

2. Определяют расчетное и экспериментальное сопротивление теплопередаче и сравнивают их между собой.

3. Оформляют отчет по выполненной работе. Отчет должен содержать схему экспериментальной установки, краткое описание работы, записи показаний измерительных приборов, обработку результатов опыта и их анализ.

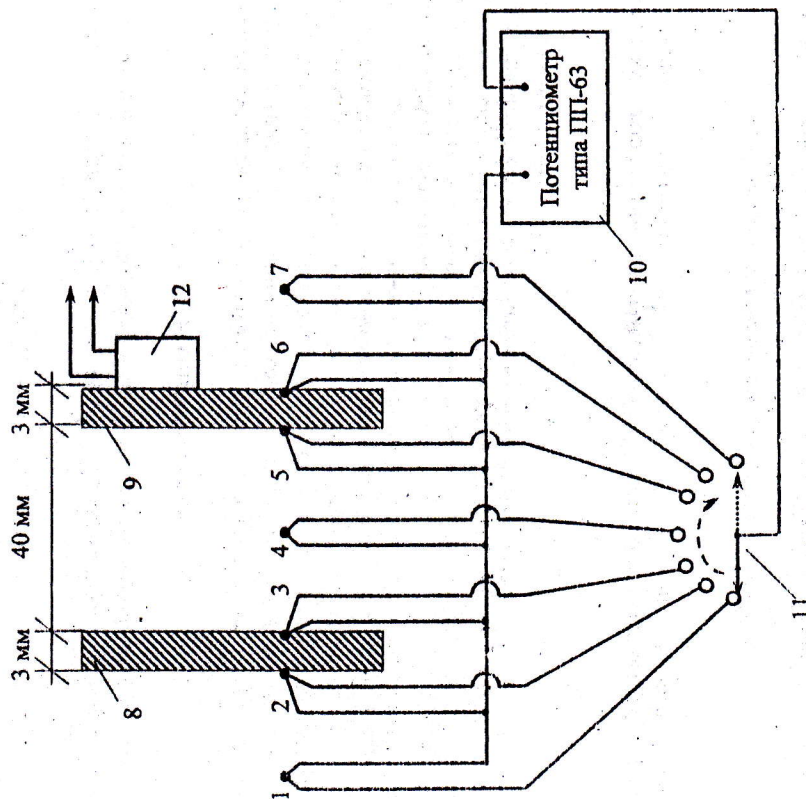


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – 7 – термомпары; 8, 9 – стекла; 10 – потенциометр; 11 – переключатель; 12 – тепломер

$$a = k \cdot m$$

где  $k$  — коэффициент формы.

### Описание установок

Испытуемый материал помещается в цилиндрический латунный стакан и закрывается крышкой с резьбой. Стакан заполняется испытуемым материалом таким образом, чтобы не оставалось никаких воздушных зазоров между поверхностью стакана, крышкой и материалом. Для измерения избыточной температуры  $[t(M, \tau) - t_c]$  в точке  $M$  испытуемого материала применяются дифференциальная термопара и потенциометр ПП-63. Один спай термопары находится внутри образца в точке  $M$ , а другой — в охлаждающей жидкости (среде). Место заделки конца термопары внутри образца не имеет принципиального значения, рекомендуется располагать спай вблизи вертикальной оси цилиндра на глубине от 1/3 до 2/3 его высоты. Спай термопары должен плотно соприкасаться с материалом образца. Для нагрева образца используется электроплита. Для выполнения условий  $Bi \geq 100$ ,  $t_c = \text{const}$  калориметр помещается в водной термостат с мешалкой, посредством которой осуществляется интенсивное перемешивание жидкости. Схема лабораторной установки приведена на рис. 6.

Коэффициент в данном случае вычисляется по формуле

$$k = \left[ \left( \frac{2,4048}{R} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{l} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

где  $l$  и  $R$  — соответственно длина и радиус внутренней полости стакана.

### Порядок выполнения лабораторной работы

При проведении эксперимента сначала измеряется длина  $l$  и диаметр  $d = 2R$  внутренней полости стакана и вычисляется коэффициент формы  $k$ . Затем стакан заполняют исследуемым материалом, закрывают крышкой с установленной термопарой и помещают для нагрева на электроплиту. После нагрева до 80...100 °С стакан переносят в термостат и включают мешалку. В процессе охлаждения стакана через каждые 60 с регистрируют показания потенциометра и заносят в табл. 4.

Таблица 4

Номер отсчета	Время $\tau$ , с	Термо-э.д.в. термопары, мВ	$[t(M, \tau) - t_c]$ , °С	$\ln [t(M, \tau) - t_c]$

различных точек  $M$  будут получаться различные прямые, однако эти прямые будут параллельны друг другу, так как угловой коэффициент у всех прямых одинаков и равен  $m$ .

Коэффициент  $m$  характеризует скорость охлаждения тела в регулярной стадии, его значение не зависит от начального температурного поля охлаждаемого тела, а определяется коэффициентом теплоотдачи, формой и размерами тела, а также и теплофизическими свойствами материала. Численное значение коэффициента  $m$  несложно определить по экспериментальной кривой охлаждения тела. Если в процессе эксперимента температура тела в некоторой точке  $M$  изменена в два различных момента времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , то подставляя экспериментальные данные в уравнение (1) и решая систему из двух уравнений, получаем следующую формулу для определения коэффициента  $m$ :

$$m = \ln \frac{t(M, \tau_1) - t_c}{t(M, \tau_2) - t_c} / (\tau_2 - \tau_1)$$

В результатах любых измерений содержится погрешности, поэтому оценка коэффициента  $m$  будет более точной и более правдоподобной, если ее определить методом наименьших квадратов. Для этого температуру тела следует измерить в процессе охлаждения более чем в два различных момента времени. После этого коэффициент  $m$  находят из условия минимума суммы квадратов разностей правых и левых частей уравнения (1) после подстановки в него экспериментальных данных, т.е. из решения следующей задачи минимизации:

$$\sum_{i=1}^n \{ \ln [t(M, \tau_i) - t_c] + m \tau_i - f(M) \}^2 \rightarrow \min_{m, f(M)}$$

здесь  $n$  — число экспериментальных точек.

Решая данную задачу минимизации методом производной, получаем, что оптимальные значения коэффициента  $m$  и  $f(M)$  следует определять по формулам:

$$m = \left\{ \sum_{i=1}^n \tau_i \ln [t(M, \tau_i) - t_c] - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n \ln [t(M, \tau_i) - t_c] \right\} / \left\{ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \tau_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n \tau_i^2 \right\}; \quad (2)$$

$$f(M) = \left\{ \sum_{i=1}^n \ln [t(M, \tau_i) - t_c] + m \sum_{i=1}^n \tau_i \right\} / n. \quad (3)$$

Установлено, что если критерий Био  $Bi \rightarrow \infty$ , а практически при  $Bi \geq 100$ , коэффициент температуропроводности  $a$  можно определить по соотношению

Обычно при проведении эксперимента производится 15–20 отсчетов. Перевод термо-э.д.с. термомпары в градусы производится по градуировочной таблице для хромель-копелева термомпар. Для надежности опыт с охлаждением калориметра проводят два – три раза при одинаковом значении  $t_c$ . Опытные данные носят на график в координатах « $\ln[t(M, \tau) - t_c] - \tau$ ». Далее из опытных данных отбирают только те экспериментальные точки, которые относятся к периоду регулярного теплового режима, т.е. точки, практически принадлежащие одной прямой и располагающиеся во второй – регулярной части графика. Примерный вид зависимости  $\ln[t(M, \tau) - t_c]$  от  $\tau$  для процесса охлаждения приведен на рис. 7.

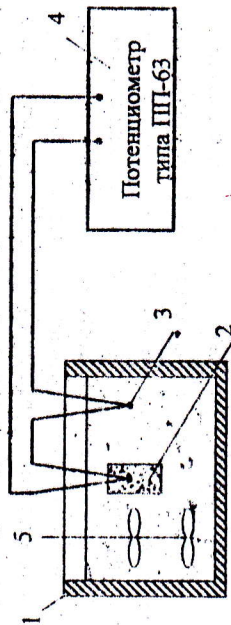


Рис. 6. Схема лабораторной установки: 1 – стакан с испытуемым материалом; 2 – калориметр; 3 – дифференциальная термомпара; 4 – потенциометр типа ПП-63; 5 – мешалка

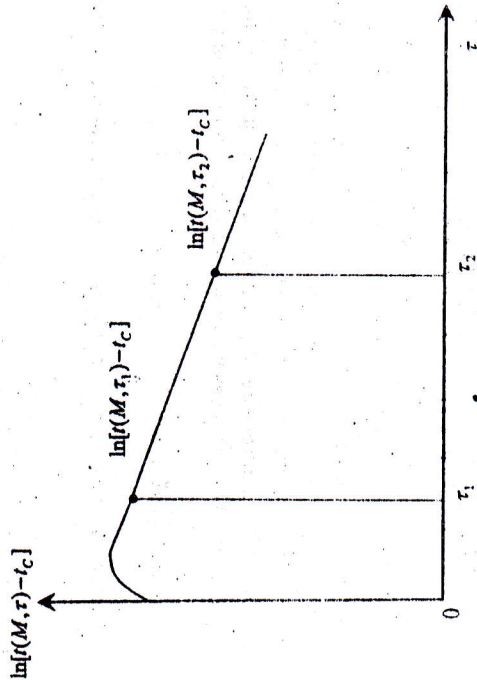


Рис. 7. Зависимость  $\ln[t(M, \tau) - t_c]$  от  $\tau$

Отобранные таким образом экспериментальные точки используют для вычисления коэффициента  $m$  и  $f(M)$  соответственно по формулам (2) и (3). Затем, подставляя найденные значения  $m$  и  $f(M)$  в уравнение (1), строят график данной зависимости, размещают экспериментальные точки на этом же координатном поле и визуально оценивают близость экспериментальных точек к построенной прямой.

Коэффициент теплопроводности  $a$  вычисляют по формуле (4).

После определения коэффициента теплопроводности дополнительно следует вычислить коэффициент теплопроводности материала  $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$ , здесь  $\rho$  и  $c$  – соответственно плотность и теплоемкость материала. При этом значение массовой теплоемкости принимают по СП 23-101-2004. Величину плотности материала определяют опытным путем. Для этого содержимое калориметра взвешивают на аналитических весах. Затем плотность материала рассчитывают, как отношение массы материала к объему внутренней полости калориметра. Опытное значение коэффициента теплопроводности сравнивают с табличным по СП 23-101-2004.

#### Лабораторная работа № 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ И ПРИВЕДЕННОЙ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПРИ СЛОЖНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ МЕЖДУ ТЕЛАМИ

#### Цель работы

Изучение экспериментального способа определения суммарных коэффициента теплоотдачи и приведенной степени черноты при сложном теплообмене между телами.

#### Теоретические сведения

Разделение общего процесса переноса теплоты на элементарные явления – теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение производится в основном из методологических соображений. В действительности же эти явления протекают одновременно и, как правило, влияют друг на друга. Конвекция, например, часто сопровождается тепловым излучением, теплопроводность в пористых телах – конвекцией и излучением в порах.

При проведении практических расчетов разделение таких сложных процессов на элементарные явления не всегда возможно и целесообразно. Обычно результирует совокупного действия отдельных элементарных явлений, приписывается одному из них, которое и считается главным. Влияние же остальных (второстепенных) явлений сказывается лишь на количественной характеристике основного

явления. Так, например, при распространении теплоты в пористом теле в качестве основного явления принято считать теплопроводность, влияние конвекции и теплового излучения в порах учитывается соответствующим увеличением значения коэффициента теплопроводности. При этом, как правило, отмечают, что механизм реального теплообмена описан такой-то моделью теплообмена. Главным обычно считают то явление, за счет которого переносится большая доля теплоты. Это явление и представляется моделью теплообмена. Более того, в реальных условиях имеется, как правило, несколько участников теплообмена. Эти участники имеют в общем случае различные собственные температуры, по разному располагаются относительно друг друга и создают различные тепловые потоки. При этом также выделяют главных участников теплообмена, влияние же других участников теплообмена обеспечивается экспериментальной настройкой модели теплообмена между главными участниками.

#### Описание установки

Лабораторная установка (рис. 8) содержит нагреваемую электрическим током стальную трубу с внешним диаметром 12 мм и длиной 1000 мм. Данная труба помещается внутрь другой стальной трубы, охлаждаемой водой и имеющей внутренний диаметр 70 мм. Для измерения температуры поверхности первой трубы используются контактирующие с ней хромель-копелевые термомпары, которые подключаются к потенциометру типа ПП-63. Температура наружной трубы поддерживается равной температуре охлаждающей воды, измеряемой также с помощью термомпар.

Примечание: при измерении температуры поверхности следует вводить поправку на температуру свободных концов термомпар. Процедура введения поправок изложена в лабораторной работе № 2. Перевод термо-э.д.с. термомпар в градусы производится по градуировочной таблице, приведенной в лабораторной работе № 2.

Для определения теплового потока (мощности), создаваемого нагревателем, используется ваттметр. Изменение теплового режима установки достигается посредством изменения напряжения на нагревателе с помощью лабораторного автотрансформатора.

#### Порядок выполнения лабораторной работы

Перед проведением эксперимента необходимо визуально проверить исправность всех элементов установки и используемых измерительных приборов, а также правильность их подключения. После этого подается вода для охлаждения, включается электропитание установки, устанавливается минимальный режим нагрева и ведется наблюдение за показаниями приборов.

Внимание: включение нагревателя и изменение его мощности производится только под наблюдением и в присутствии руководителя.

Первый отсчет показаний производится после полной стабилизации режима. Все отсчеты записываются в таблицу 5. По окончании первого опыта по указанию руководителя устанавливается новый тепловой режим, и только после того, как процесс снова стабилизируется, все показания приборов также записываются в табл. 5.

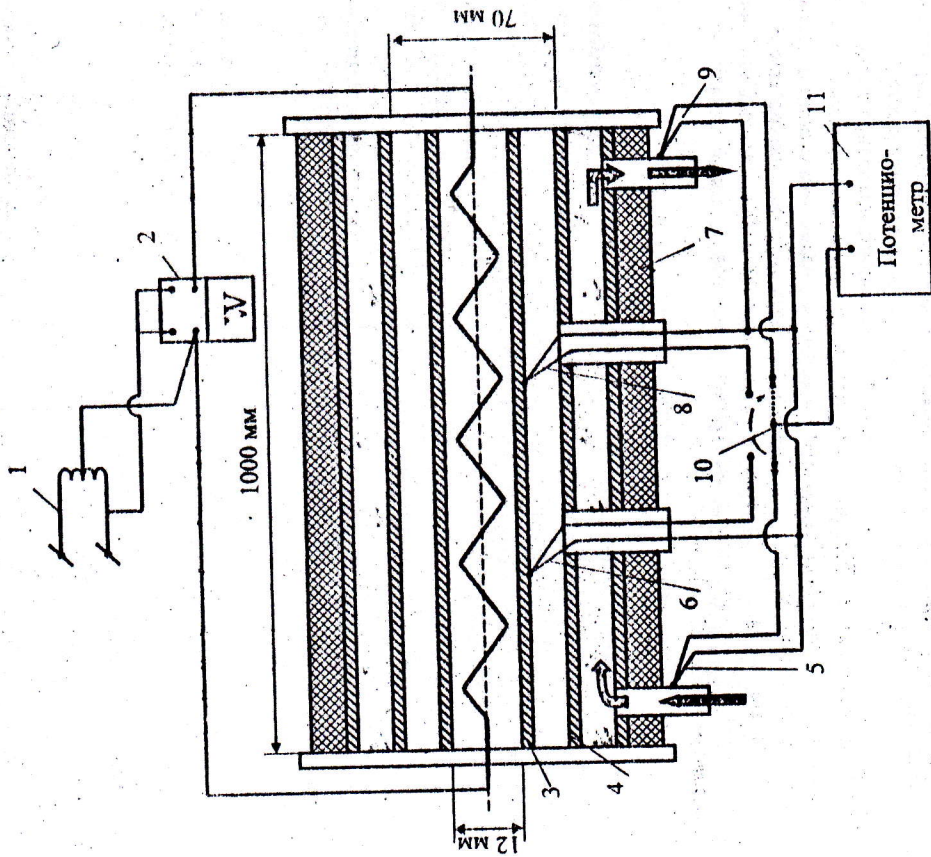


Рис. 8. Схема лабораторной установки: 1 – лабораторный трансформатор; 2 – ваттметр; 3 – труба-нагреватель; 4 – охлаждаемая труба; 5, 6, 8, 9 – термомпары; 7 – теплоизоляция; 10 – переключающий термомпар; 11 – потенциометр типа ПП-63

Таблица 5

Наименование величины	Значение величины в опытах		
	1	2	3
Мощность нагрева $E$ , Вт			
Показания термометра, мВ:			
$E_3$			
$E_2$			
$E_1$			
$E_4$			
Температура первой и второй точек охлаждаемой трубы, °C:			
$t_3$			
$t_2$			
Средняя температура охлаждаемой трубы, °C			
$t_2$			
Температура первой и второй точек горячей трубы, °C:			
$t_6$			
$t_5$			
Средняя температура горячей трубы, °C			
$t_1$			

В данном случае участниками теплообмена являются труба-нагреватель, охлаждаемая труба и воздух в замкнутом пространстве между трубами. Главными участниками теплообмена считаются труба-нагреватель и охлаждаемая труба, их температуры измеряют с помощью термометра. Механизм реального теплообмена здесь таков: лучистый теплообмен между трубами через воздушный промежуток, который сам излучает и поглощает тепловую энергию, а также создает конвективный перенос теплоты.

Если механизм реального теплообмена формально описать конвективной моделью, то получим следующую формулу для вычисления суммарного коэффициента теплоотдачи для внешней поверхности трубы-нагревателя:

$$\alpha_{ZH} = Q / [F_H (t_1 - t_2)],$$

здесь  $F_H$  — площадь внешней поверхности трубы-нагревателя.

Суммарный коэффициент теплоотдачи для внутренней поверхности охлаждаемой трубы определяется по аналогичной формуле:

$$\alpha_{ZO} = Q / [F_O (t_1 - t_2)],$$

где  $F_O$  — площадь внутренней поверхности охлаждаемой трубы.

Найденные таким образом численные значения  $\alpha_{ZH}$  и  $\alpha_{ZO}$  будут учитывать перенос теплоты не только конвекцией, но и излучением, вследствие этого их и называют суммарными коэффициентами теплоотдачи. Соотношение между  $\alpha_{ZH}$  и  $\alpha_{ZO}$  представляется следующей формулой:

$$\alpha_{ZH} = \alpha_{ZO} \cdot \frac{F_O}{F_H}$$

Если реальный теплообмен описать лучистой моделью, то получим следующую формулу для вычисления суммарной приведенной степени черноты системы:

$$\epsilon_{ЛПР} = Q / \{ c_0 F_H [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4] \},$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $T_1$  и  $T_2$  — абсолютные температуры трубы-нагревателя и охлаждаемой трубы.

Нетрудно видеть, что в данном случае лучевоспринимающая поверхность равна внешней поверхности трубы-нагревателя, т.е.  $F_H$ . Здесь  $\epsilon_{ЛПР}$  также будет учитывать не только фактические значения коэффициентов черноты элементов системы и их взаимное расположение, но и конвективный перенос теплоты.

Найденные таким образом  $\alpha_{ZH}$  и  $\epsilon_{ЛПР}$ , как известно, будут связаны следующим соотношением:

$$\alpha_{ZH} = \epsilon_{ЛПР} \cdot c_0 \cdot 10^{-8} (T_1 + T_2) \cdot [(T_1)^2 + (T_2)^2] / J.$$

Количество переносимой теплоты  $Q$  определяется по показаниям ваттметра.

Для всех тепловых режимов следует определить  $\alpha_{ZH}$  и  $\epsilon_{ЛПР}$  и проверить выполнение связывающего их равенства.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ

### Цель работы

Экспериментальное определение степени черноты поверхности металла методом сравнения.

### Теоретические сведения

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии тел с помощью электромагнитных волн. Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной (непрерывный) спектр излучения, т.е. излучает энергию во всем диапазоне длин волн от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ . Металлы с полированной поверхностью, газы и пары характеризуются селективным (прерывистым) спектром излучения. Мощность излучения зависит от природы тела, его температуры, длины волны, состояния поверхности, а для газов — еще и от толщины слоя и давления. У твердых тел в процессах лучистого теплообмена участвуют лишь тонкие поверхностные слои, поэтому в этих случаях тепловое излучение можно рассматривать, как поверхностное явление. Полупрозрачные тела, газы и пары имеют объемный характер излучения. С увеличением температуры тела энергия излучения увеличивается, так как увеличивается внутренняя энергия. Причем, с ростом температуры повышается интенсивность коротковолнового излучения, интенсивность длинноволнового излучения падает. Известно, что при температурах до 4000 К большая часть энергии излучения приходится на инфракрасную ( $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-6} \dots 0,8 \cdot 10^{-3}$  м) и видимую ( $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-6} \dots 0,8 \cdot 10^{-6}$  м) области спектра.

Одной из важных характеристик лучистого теплообмена является коэффициент черноты тела. Различают интегральный  $\varepsilon$  и монохроматический  $\varepsilon_\lambda$  коэффициенты черноты тела.  $\varepsilon$  характеризует излучательные свойства тела во всем диапазоне длин волн от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ ,  $\varepsilon_\lambda$  характеризует излучательные свойства тела только на определенной длине волны  $\lambda$ . Для реальных тел  $0 \leq \varepsilon, \varepsilon_\lambda \leq 1$ , т.е. излучательные свойства реальных тел хуже излучательных свойств абсолютно черного тела (а.ч.т.), для которого  $\varepsilon, \varepsilon_\lambda = 1$ . Серым называется такое тело, для которого  $\varepsilon_\lambda = \text{const}$  для  $\forall \lambda \in [0, \infty)$  и не зависит от температуры, а спектр излучения полностью подобен спектру а.ч.т. при такой же температуре.

### Описание установки

Установка состоит из двух одинаковых грубчатых электронагревателей (ТЭНов) (рис. 9), один из которых покрыт слоем сажи, поверхность другого ТЭНа — чистая. Напряжение на нагревателях изменяется с помощью лабораторных автотрансформаторов (или регуляторов напряжения). Для определения мощности, расходуемой ТЭНами, используются ваттметры. Температура ТЭНов измеряется хромель-копелевыми термомпарами, рабочие спаи которых закреплены на поверхности нагревателей, термомпары подключены через переключатель к потенциометру типа ПП-63.

**Примечание:** при измерении температуры поверхностей следует вводить поправки на температуру свободных концов термомпар. Процедура введения поправки изложена в лабораторной работе № 2. Перевод термо-э.д.с. термомпар в градусы производится по градуировочной таблице, приведенной в лабораторной работе № 2.

### Порядок выполнения лабораторной работы

Определение степени черноты  $\varepsilon$  поверхности материала методом сравнения заключается в следующем: ТЭН № 1 принят за эталон, степень черноты его известна. Степень черноты ТЭН № 2 необходимо определить.

Каждый из нагревателей передает тепло окружающей среде как излучением, так и конвекцией:  $Q_1 = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{конв}}$ ,  $Q_2 = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{конв}}$ . Если в процессе эксперимента температуру ТЭНов поддерживать одинаковой, то при таких условиях конвективные теплопотери будут равны  $Q_{\text{конв}1} = Q_{\text{конв}2}$ . Поэтому  $Q_{\text{изл}1} - Q_{\text{изл}2}$ . Вместе с тем известно, что теплопотери излучением определяются следующим образом:

$$Q_{\text{изл}1} = \varepsilon_{\text{пр}1} c_0 F_1 [(T_1/100)^4 - (T_c/100)^4];$$

$$Q_{\text{изл}2} = \varepsilon_{\text{пр}2} c_0 F_2 [(T_2/100)^4 - (T_c/100)^4].$$

Здесь приведенные степени черноты  $\varepsilon_{\text{пр}1}$  и  $\varepsilon_{\text{пр}2}$  будут равны собственным коэффициентам черноты ТЭНов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (почему?), т.е.  $\varepsilon_{\text{пр}1} = \varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_{\text{пр}2} = \varepsilon_2$ ,  $F_1$  и  $F_2$  — площади поверхности первого и второго ТЭНов соответственно,  $T_1$  и  $T_2$  — абсолютные температуры первого и второго ТЭНов соответственно,  $T_c$  — абсолютная температура окружающей среды. При  $F_1 = F_2 = F$ ,  $T_1 = T_2 = T$  найдем, что собственная степень черноты второго ТЭНа

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{Q_{\text{изл}1} - Q_{\text{изл}2}}{c_0 F [(T/100)^4 - (T_c/100)^4]},$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  определяются по показаниям ваттметров.

Опыт проводится в следующем порядке. Проверив схему экспериментальной установки, включают ее в электрическую сеть и посстреляют в течение 20–30 минут. Далее считывают показания термомпар, при неравенстве показаний изменяют напряжение на ТЭНах до тех пор, пока не достигнут равенства показаний в стационарном режиме. После этого показания всех измерительных приборов записывают в табл. 6 и определяют степень черноты  $\epsilon_2$ .

Таблица 6

№ п/п	ТЭН 1		ТЭН 2		Температура окружающей среды $t_{ср}$ , °C		Примечание
	$W_1 = Q_1$	Температура поверхности °C	$W_2 = Q_2$	Температура поверхности °C			
					мВ	мВ	

Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТЕНЫ ЗДАНИЯ

#### Цель работы

Изучение распределения температуры по толщине стены здания и экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи для внутренней и внешней поверхностей ограждения.

#### Теоретические сведения

Основной физической величиной, характеризующей процессы теплообмена, является температура. Температура изменяется в пространстве и во времени, т.е.

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

где  $x, y, z$  – пространственные координаты точки,  $\tau$  – время.

Совокупность значений температуры во всех точках изучаемого пространства в определенный момент времени называется температурным полем. Так как

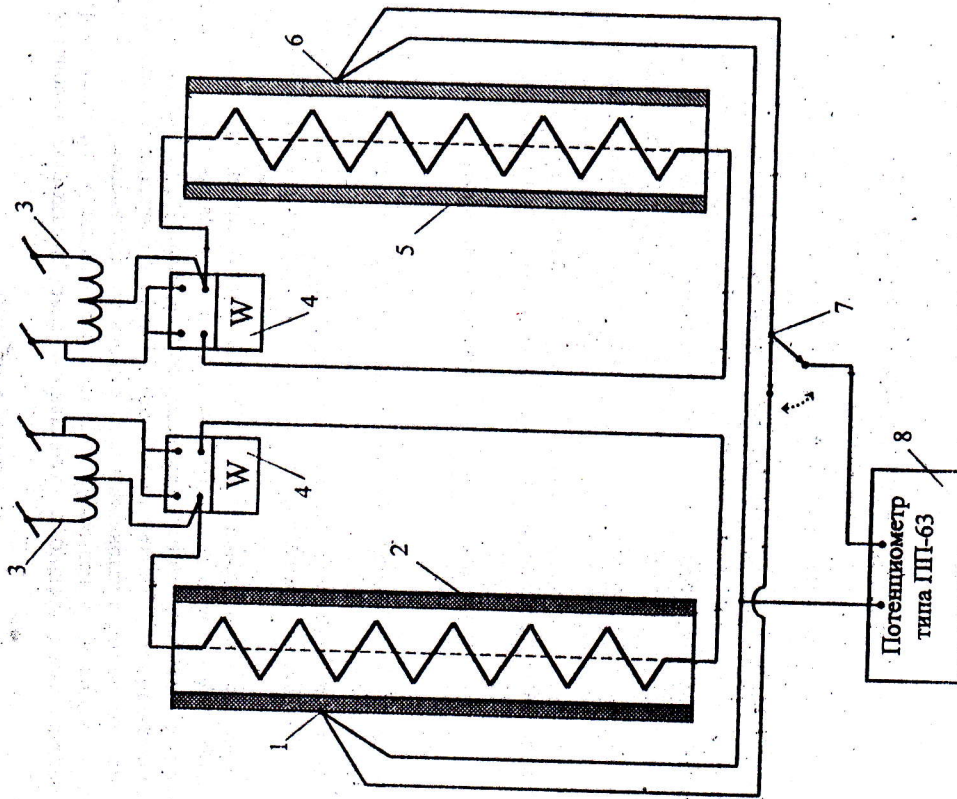


Рис. 9. Схема экспериментальной установки: 1, 6 – термопары; 2 – первый ТЭН; 3 – автотрансформаторы; 4 – ваттметры; 5 – второй ТЭН; 7 – переключатель; 8 – потенциометр типа ПП-63



температура величина скалярная, то и температурное поле является скалярным полем.

Различают стационарные и нестационарные температурные поля. Нестационарное температурное поле это такое поле, температура в каждой точке которого изменяется с течением времени. Уравнение (1) есть математическая запись нестационарного температурного поля. Если температура в каждой точке пространства не изменяется во времени ( $\partial t / \partial \tau = 0$ ) и является функцией только ее пространственных координат ( $t = f_1(x, y, z)$ ), то такое температурное поле называется стационарным.

Различают трехмерные, двумерные и одномерные температурные поля. Если температура в каждой точке пространства зависит от всех трех ее пространственных координат, то температурное поле будет трехмерным. Если температура есть функция только двух пространственных координат, то температурное поле будет двумерным. Если температура есть функция только одной пространственной координаты, то температурное поле называется одномерным.

Примером одномерного температурного поля является температурное поле неограниченной плоской стенки (это когда толщина стенки значительно меньше двух других ее размеров). Известно, что в стационарном режиме температура по толщине однослойной плоской стенки распределяется по прямой, а по толщине многослойной — по ломаной.

Температурное поле окружающей среды (внутреннего и наружного воздуха) вследствие ее существенной подвижности с достаточной точностью можно считать равномерным, только следует учитывать, что вблизи поверхности ограждения в окружающей среде наблюдается некоторое искривление температурного поля. Это искривление температурного поля происходит из-за наличия вблизи поверхности твердого тела теплового пограничного слоя — слоя, в пределах которого температура окружающей среды изменяется от температуры поверхности стенки до температуры среды вдали от стенки.

Согласно закону Ньютона — Рихмана плотность теплового потока  $q$  конвекцией следует вычислять по формуле

$$q = \alpha(t_c - t_n),$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $t_c$  и  $t_n$  — соответственно температура среды за пределами теплового пограничного слоя и температура поверхности тела. Поэтому для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\alpha = \frac{|q|}{t_c - t_n}. \quad (2)$$

## Описание установки

В данной лабораторной работе используется тот же лабораторный стенд, что и в лабораторной работе № 3, только теперь в эксперименте необходимо регистрировать показания всех термомпар, а также показания тепломра.

### Порядок выполнения лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы регистрируют показания всех термомпар и тепломра, далее так же, как и в лабораторной работе № 3, определяют температуру в исследуемых точках стены и плотность теплового потока  $q$ . Затем на чертеже стены здания, где указаны толщина конструктивных слоев и места расположения термомпар, отмечают найденные измерениям температуры точек и, используя известные теоретические сведения о температурных полях плоских ограждений, вычерчивают линию распределения температуры по толщине стены и в окружающей среде.

По формуле (2) вычисляют коэффициенты теплоотдачи для внутренней и внешней поверхностей стены здания и сравнивают найденные значения с рекомендуемыми СП 23-101-2004 и СНиП 23-02.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОКНА СО СПАРЕННЫМИ ПЕРЕПЛЕТАМИ И ДВОЙНЫМ ОСТЕКЛЕНИЕМ

#### Цель работы

Изучение распределения температуры в окне здания и экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи для его внутренней и внешней поверхностей.

#### Теоретические сведения

Воздушная прослойка в конструкции данного окна считается достаточно герметичной. Известно, что тепло через воздушную прослойку в общем случае переносится теплопроводностью, конвекцией и излучением. В вертикальных воздушных прослойках, если их толщина соизмерима с высотой, восходящие потоки у поверхностей с большей температурой и нисходящие потоки у холодных поверхностей могут двигаться без взаимных помех. В тонких вертикальных прослойках они взаимно тормозятся и образуют циркуляционные контуры, высота которых зависит от ширины прослойки. При малых толщинах и небольших раз-

ностях температур имеет место ламинарный режим течения вдоль стекла, критическая толщина воздушной прослойки в мм, при не превышении которой имеет место ламинарный режим, определяется по формуле  $\delta_{кр} = 20 \cdot \Delta t^{1/3}$  (если средняя температура воздуха примерно равна  $0^\circ\text{C}$ ). Следовательно, при  $\delta < \delta_{кр}$  перенос теплоты через слой воздуха осуществляется теплопроводностью. В противном случае считается, что через слой воздуха теплота переносится конвекцией и поэтому в первом приближении можно полагать, что температурное поле по толщине воздушной прослойки в этом случае достаточно равномерное. Конечно, в любом случае вблизи стекла окна наблюдаются тепловые пограничные слои.

#### Описание установки

В данной лабораторной работе используется тот же лабораторный стенд, что и в лабораторной работе № 4, только теперь в эксперименте необходимо регистрировать показания всех термомпар, а также и показания тепломера.

#### Порядок выполнения лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы регистрируют показания всех термомпар и тепломера, далее также как и в лабораторной работе № 4 определяют температуры в исследуемых точках стены и плотность теплового потока  $q$ . Затем на чертеже окна, где указаны толщина стекла и места расположения термомпар, отмечают найденные измерением температуры точек и, используя известные теоретические сведения о температурных полях плоских ограждений и замкнутых вертикальных воздушных прослоек, вычерчивают линию распределения температуры в окне и в окружающей среде.

По формуле (2) лабораторной работы № 8 вычисляют коэффициенты теплоотдачи для внутренней и внешней поверхностей окна.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломаассоперенос. — М.: Академкнига, 2002. — 454 с.
2. Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. — 4-е изд. / — М.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.
3. Беляев Н.М. Основы теплопередачи. — Киев: Выш. шк., 1989. — 343 с.
4. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. — М.: Вышш. шк., 1989. — 375 с.

#### ОГЛАВЛЕНИЕ

Порядок выполнения лабораторных работ и составления отчета .....	3
Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента теплопроводности строительных материалов методом плиты .....	5
Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом трубы .....	10
Лабораторная работа № 3. Исследование теплозащитных качеств наружной стены .....	13
Лабораторная работа № 4. Исследование теплозащитных свойств окна со спаренными переплетами и двойным остеклением .....	16
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом регулярного теплового режима .....	19
Лабораторная работа № 6. Определение суммарных коэффициентов теплоотдачи и приведенной степени черноты при сложном теплообмене между телами .....	23
Лабораторная работа № 7. Определение степени черноты поверхности материала методом сравнения .....	28
Лабораторная работа № 8. Исследование температурного поля и определение коэффициента теплоотдачи для внутренней и внешней поверхностей стены здания .....	31
Лабораторная работа № 9. Исследование температурного поля и определение коэффициентов теплоотдачи для внутренней и внешней поверхностей окна со спаренными переплетами и двойным остеклением .....	34
Библиографический список .....	34

Владимир Иванович Панферов

**ТЕПЛОМАССОБМЕН**

Учебное пособие к лабораторным работам

Техн.редактор А.В.Миних

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

Подписано в печать 12.04.2005. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная  
Усл.печ.л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,28. Тираж 100 экз. Заказ 81/103.Цена 18 р.

---

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76.