

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ В МЕТАЛЛУРГИИ

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
для слушателей специальности
переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое
производство и материалобработка»
заочной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 66.045.1(075.8)
ББК 31.368я73
Р58

*Рекомендовано кафедрой «Металлургия и технологии
обработки материалов» ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 07.12.2020 г.)*

Рецензент: декан механико-технологического факультета канд. техн. наук, доц.
И. Б. Одарченко

Ровин, Л. Е.
Р58 Теплообменные аппараты в металлургии : практикум по выполнению лаборатор. работ для слушателей специальности переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалобработка» заоч. формы обучения / Л. Е. Ровин. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2021. – 35 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Изложено описание лабораторных работ, включая теоретические основы, по разделам «Теплопередача» и «Теплообменные аппараты».

Для слушателей специальности переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалобработка» ИПКиП.

УДК 66.045.1(075.8)
ББК 31.368я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2021

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире энергосбережение является стратегической задачей государственного масштаба. Между тем на многих предприятиях имеют место значительные энергетические потери за счет недостаточного использования тепла, вырабатываемого в технологических процессах. Это приводит к колоссальным энергетическим потерям в объемах предприятия, страны, а также определяет различные проблемы экологического характера.

Рекуперация тепла позволяет экономить до 30-40 % потребляемой энергии. Кроме того, для случая рекуперации тепла в цикле печного нагрева использование подогретого воздуха улучшает горение топлива в печи, снижает его химический и механический недожог.

Особенно это актуально для высокотемпературных металлургических производств (~ 1000 °С и более), т. е. именно там, где энергетические потери наиболее велики, а также при использовании газов, содержащих большое количество примесей и агрессивных веществ. Высокие потери объясняются низкой эффективностью и быстрым выходом из строя теплообменных аппаратов при высоких температурах и аппаратов, работающих в сложных условиях эксплуатации, а также отсутствием подходящих для конкретного производства теплоутилизирующих устройств.

В пособие включены общие сведения о теплообменных аппаратах, способах передачи тепла через одно- и многослойную стенки, режимах остывания заготовок, примеры решений, необходимые справочные данные и список литературы.

Пособие подготовлено в соответствии с типовым учебным планом переподготовки, утвержденным 15.09.2017, регистрационный № 25-13/113, заочной формы обучения, и предназначено слушателям Института повышения квалификации специальности 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалобработка», квалификации-инженер. Будет полезно также студентам соответствующей специальности и инженерам-металлургам.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплообменными аппаратами называются устройства, предназначенные для передачи теплоты от одного теплоносителя к другому.

Рекуператор (от лат. recuperator — получающий обратно, возвращающий) — теплообменник поверхностного типа для использования теплоты отходящих газов, в котором теплообмен между агентами осуществляется непрерывно через разделяющую их стенку. Рекуператор – это устройство, работающее по принципу бесконтактного обмена тепла и холода. Потoki воздуха не перемешиваются – холодный поток нагревается, а теплый охлаждается.

Рекуперация тепла отходящих газов топливных печей – наиболее эффективный метод энергосбережения. Воздух, подаваемый на горелки, подогревается в рекуператоре или регенераторе за счет теплоты уходящих газов. Таким образом часть энергии возвращается в рабочее пространство печи с подогретым воздухом.

Возврат в печь тепловой энергии, теряемой с отходящими газами, является не только средством повышения термического КПД, но и улучшает технологические характеристики агрегата. Горячее дутье повышает производственную гибкость печей, что, конечно, реализуется при соответствующем уровне информационных технологий: развитой системе КИПиА, компьютерном управлении, квалифицированном персонале.

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА РЕКУПЕРАТОРОВ

По преобладающему виду теплоотдачи от дымовых газов к стенке рекуператоры могут быть конвективными, радиационными и конвективно-радиационными.

По схеме движения горячего и холодного теплоносителей различают рекуператоры прямоточные, противоточные и перекрестного тока (рис. 1).

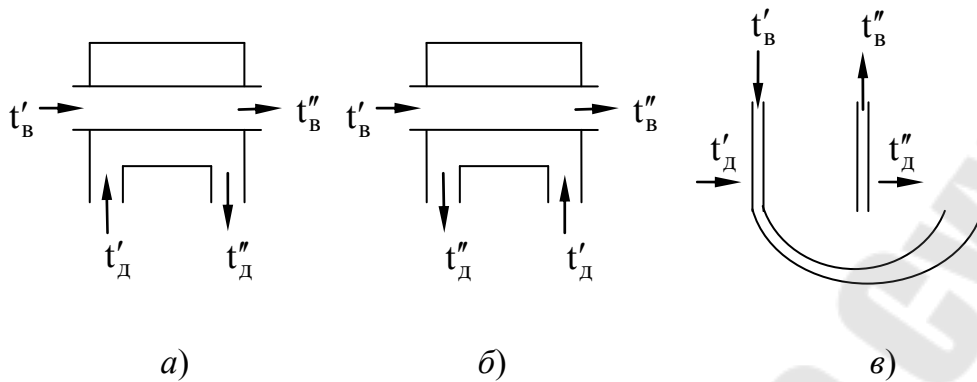


Рис. 1. Схемы движения теплоносителей в рекуператоре:
 а – прямоток; б – противоток; в – перекрестный ток

Рассмотрим схему теплообмена при передаче теплоты через стенку рекуператора (рис. 2). В рекуператоре нагревается сухой воздух, состоящий из двухатомных газов N_2 и O_2 , которые прозрачны для тепловых лучей. Слева от стенки находится горячий теплоноситель – дым, в составе которого имеются трехатомные продукты горения CO_2 и H_2O , способные излучать тепловой поток. В связи с этим коэффициент теплоотдачи от дыма к стенке включает лучистую $\alpha_{\text{д}}^{\text{луч}}$ и конвективную $\alpha_{\text{д}}^{\text{к}}$ составляющие: $\alpha_{\text{д}} = \alpha_{\text{д}}^{\text{луч}} + \alpha_{\text{д}}^{\text{к}}$, тогда как со стороны воздуха только конвективную $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}}^{\text{к}}$.

Тепловой поток от дыма к воздуху преодолевает три тепловых сопротивления: от дыма к стенке – $1/\alpha_{\text{д}}$, внутреннее сопротивление стенки – S/λ и от стенки к воздуху – $1/\alpha_{\text{в}}$. Как известно из теплотехники, коэффициент теплопередачи для плоской стенки будет равен (Вт/(м²·К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{д}}} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}}$$

а тепловой поток через стенку площадью F , м²

$$Q = k \cdot \overline{\Delta t} \cdot F, \text{ Вт,}$$

где k и $\overline{\Delta t}$ – средние по поверхности F значения коэффициента теплопередачи и разности температур между дымом и воздухом.

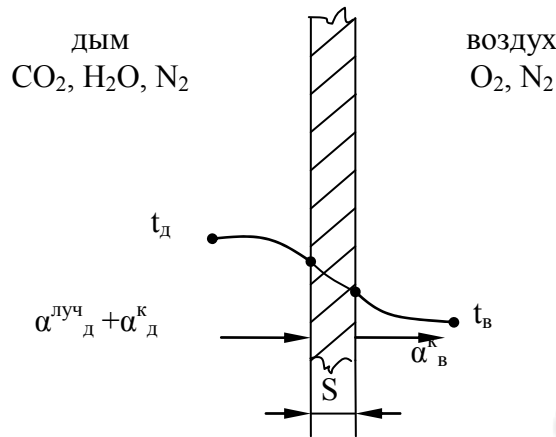


Рис. 2. Схема теплопередачи через стенку рекуператора

Это выражение называют уравнением теплопередачи в рекуператоре, а $\bar{\Delta t}$ – средним «температурным напором», который находят по формуле среднего логарифмического:

$$\bar{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}},$$

$\Delta t'$ и $\Delta t''$ представляют из себя разности температур дыма и воздуха через разделительную стенку на входе и выходе дымовых газов из рекуператора.

Характер температурных полей определяется уравнением теплового баланса рекуператора:

$$G_{\text{д}} \cdot (i'_{\text{д}} - i''_{\text{д}}) \cdot (1 - \eta_{\text{пот}}) = G_{\text{в}} \cdot (i''_{\text{в}} - i'_{\text{в}})$$

или

$$G_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}} (t'_{\text{д}} - t''_{\text{д}}) \cdot (1 - \eta_{\text{пот}}) = G_{\text{в}} \cdot \bar{c}_{\text{в}} (t''_{\text{в}} - t'_{\text{в}}), \quad (5.4)$$

где $G_{\text{д}}$ и $G_{\text{в}}$ – массовые расходы дыма и воздуха, кг/с; $t'_{\text{д}}$ и $t''_{\text{д}}$ – температуры дыма на входе в рекуператор и на выходе из него, °С; $t'_{\text{в}}$ и $t''_{\text{в}}$ – то же для воздуха, °С; $\eta_{\text{пот}} = 0,05-0,1$ – коэффициент потерь теплоты в окружающую среду.

Из уравнения теплового баланса для идеального рекуператора (при $\eta_{\text{пот}} = 0$) получаем соотношения:

$$\frac{G_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}}}{G_{\text{в}} \cdot \bar{c}_{\text{в}}} = \frac{t''_{\text{в}} - t'_{\text{в}}}{t'_{\text{д}} - t''_{\text{д}}}$$

или

$$t'_d - t''_d = (t''_b - t'_b) \cdot \frac{G_b \cdot \bar{c}_b}{G_d \cdot \bar{c}_d}.$$

По физическому смыслу, $G_d \cdot \bar{c}_d$ и $G_b \cdot \bar{c}_b$ – это теплоемкости секундного расхода дыма и воздуха (водяные эквиваленты).

В расчете рекуператора используются два уравнения: теплового баланса и теплопередачи.

Находят неизвестную температуру дыма на выходе из рекуператора t''_d и количество передаваемой воздуху теплоты Q :

$$Q = G_b \cdot \bar{c}_b (t''_b - t'_b).$$

Определяют искомую величину поверхности теплообмена

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}.$$

В металлических рекуператорах внутреннее тепловое сопротивление стенки S/λ пренебрежимо мало по сравнению с величинами $1/\alpha_d$ и $1/\alpha_b$, поэтому формула упрощается:

$$k = \alpha_d \cdot \alpha_b / (\alpha_d + \alpha_b).$$

Типовые конструкции рекуператоров металлургических печей

Рекуператоры различают:

– по схеме относительного движения теплоносителей – противоточные, прямоточные и перекрестные; по конструкции – трубчатые, пластинчатые, оребренные и др.; по назначению – подогреватели воздуха, газа, жидкостей, испарители, конденсаторы и т. д.

Основные принципиальные схемы металлических рекуператоров представлены на рис. 3а, 3б, и 3в.

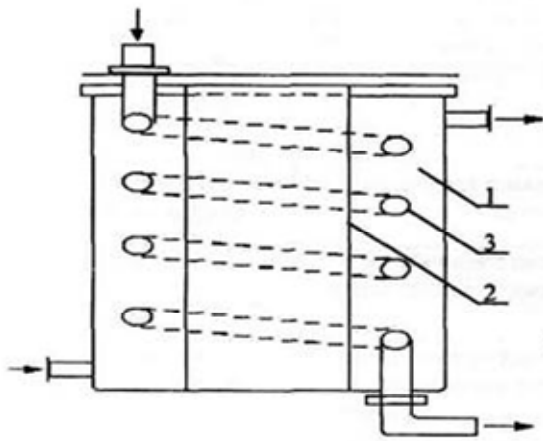


Рис. 3а. Схема металлического змеевикового теплообменника: 1 – камера, 2 – труба, 3 – змеевик

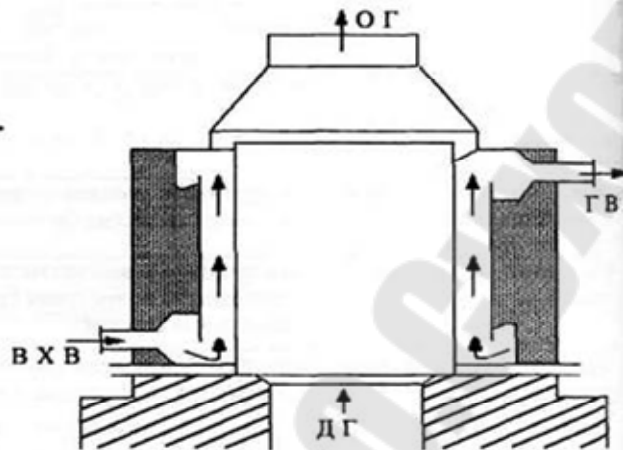


Рис. 3б. Радиационный рекуператор: ОГ – охлажденные газы; ДГ – дымовые газы, ВХВ – ввод холодного воздуха, ГВП – горячий воздух подаваемый в печь

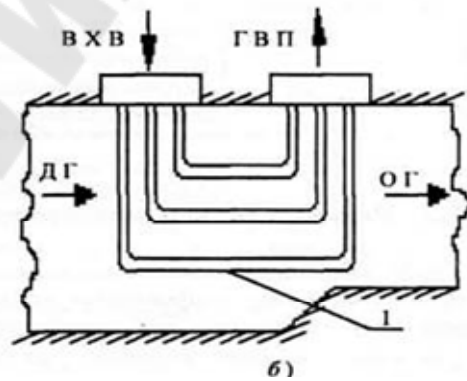
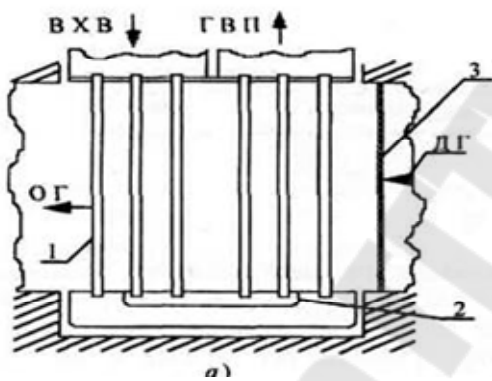


Рис. 7в. Конвективные рекуператоры: а – прямотрубные, б – петлеобразные

Лабораторная работа № 1

«Определение коэффициента теплоотдачи от охлаждающегося тонкого тела»

Цель работы: экспериментальное определение и расчет коэффициента теплоотдачи конвекцией и излучением.

Общие сведения

Тепловое излучение – это особый вид переноса тепловой энергии, осуществляемого электромагнитными волнами, который возможен не только в однородной изотропной среде, но и в вакууме. Законы теплового излучения тождественны законам оптики и электромагнетизма. Теория представляет лучистый перенос теплоты как поток, имеющий как волновой, так и квантовый характер распространения. Количество теплоты излучаемой нагретым телом, пропорционально четвертой степени абсолютной температуры этого тела (Дж):

$$Q = C(T/100)^4 F\tau,$$

где C – коэффициент излучения, Вт/(м²·К); F – поверхность, м²; τ – время, с.

Теплообмен в рабочем пространстве печей происходит, в основном, за счет излучения и может составлять от 60 до 100 % от общей передачи теплоты.

Поток теплоты, испускаемый телом или средой, называют собственным потоком излучения $Q_{\text{соб}}$.

Поток теплоты, попавший на рассматриваемую поверхность, называют падающим $Q_{\text{пад}}$. Часть этого потока, отраженную телом, – отраженным $Q_{\text{отр}}$, а часть потока, поглощенную телом, – поглощенным потоком $Q_{\text{погл}}$.

Сумма потоков собственного и отраженного излучения получила название эффективного потока $Q_{\text{эф}} = Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}$.

Результат теплообмена излучением между двумя телами характеризуется потоком, оставшимся в теле, называемым результирующим или сальдо потоком и равным разности падающего и эффективного или поглощенного и собственного потоков излучения:

$$Q_s = Q_{\text{рез}} = Q_{\text{пад}} - Q_{\text{эф}} = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{соб}}$$

Тела, полностью поглощающие падающий на их поверхность тепловой поток, называют абсолютно черными, а тела, полностью отражающие этот поток – абсолютно белыми.

Все реальные твердые тела могут частично поглощать и частично отражать поток излучения, падающий на поверхность.

Газовые среды могут сами излучать теплоту (при наличии в их составе трех и более атомных газов), могут частично поглощать и пропускать поток теплоты.

Расчеты теплообмена излучением должны учитывать как диффузность (распространение по всем направлениям), так и направленность (в определенном телесном угле) излучения.

Конвекция – вид передачи теплоты, при непосредственном контакте движущейся жидкости или газа с твердой поверхностью при наличии между ними разности температур. Конвекция непосредственно связана с движением среды относительно поверхности, или наоборот.

Различают два вида конвекции: естественную (свободную) и вынужденную. При передаче теплоты естественной конвекцией движущей силой среды является разность плотностей этой среды, вызванная разностью температур как в самой среде, так и между средой и поверхностью. Передача тепла при вынужденной конвекции осуществляется в условиях, когда среда движется относительно под действием внешних сил, создаваемых побудителями движения.

Независимо от вида конвекции тепловой поток определяется по закону Ньютона:

$$Q = \alpha(T_f - T_s)F \text{ (Вт)}$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м² · °С); T_f , T_s – температуры среды и поверхности, °С; F – площадь поверхности, м².

В случае, если передача теплоты идет от поверхности, имеющей более высокую температуру, к среде, имеющей более низкую температуру, в формуле температуры меняют местами.

Для определения количества тепла, передаваемого конвекцией, обычно пользуются уравнением Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha(T_f - T_s)Ft, \text{ (Дж)}$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м² · °С); T_f , T_s – температуры поверхности и среды, °С; F – площадь поверхности, м²; t – время, с.

При охлаждении нагретого тела в условиях стационарного теплового режима, имеет место баланс теплоты.

Количество теплоты, теряемое телом в окружающую среду, с одной стороны, определяется как теряемое телом массой m и теплоемкостью c при понижении температуры от T_1 до T_2 , с другой стороны по закону Ньютона-Рихмана, как отдаваемое поверхностью этого тела в среду за время t при среднем коэффициенте теплоотдачи α_0 :

$$cm(T_1 - T_2) = \alpha_0(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})Ft,$$

где $T_{\text{п}}$ – температура поверхности тела; $T_{\text{с}}$ – температура окружающей среды; F – площадь поверхности тела; α_0 – средний коэффициент теплоотдачи; c – удельная теплоемкость тела; m – масса тела.

Температура теплоотдающей поверхности $T_{\text{п}}$ принимается средней за расчетный период t . Температура среды $T_{\text{с}}$ принимается постоянной.

Из уравнения можно определить значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_0 = \frac{cm(T_1 - T_2)}{F(T_{\text{п}} - T_{\text{ср}})t}.$$

Порядок проведения работы.

1. Для проведения лабораторной работы необходима экспериментальная установка, которая состоит из лабораторной шахтной печи 1, штатива 2 и медного цилиндра 3 диаметром 13 мм и высотой 200 мм. Внутренний диаметр цилиндра – 9,7 мм. В середину цилиндра вставлена хромель-алюмелевая термопара, соединенная с прибором для регистрации температуры 4.

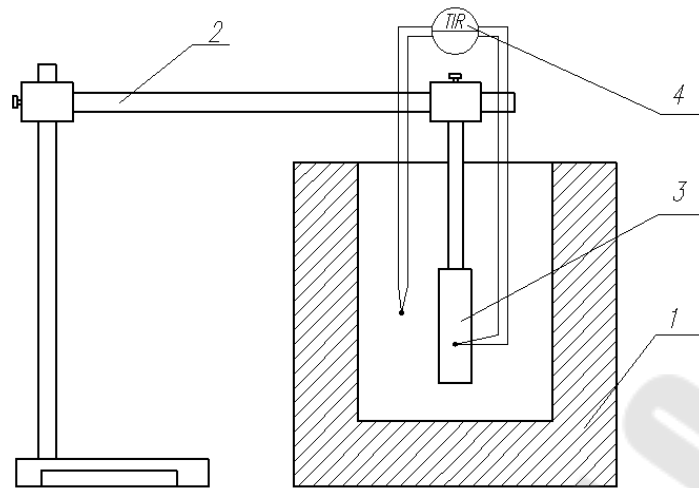


Рис. 4. Схема установки

2. Цилиндр разогревают в другой нагревательной печи до температуры 800–850 °С, подвешивают на штатив и производят измерения температуры тела через определенные промежутки времени. Так как в эксперименте используется тонкостенное тело, можно предположить, что изменение температуры по толщине стенки невелико и во всех расчетах принимать равными температуру поверхности $T_{\text{п}}$ и среднюю температуру по сечению стенки тела T . Полученные данные записывают в виде таблицы.

3. По результатам эксперимента построить графики изменения температуры по времени.

4. Рассчитать общий коэффициент теплоотдачи для определенного промежутка времени по формуле:

$$\alpha_0 = \frac{cm(T_1 - T_2)}{F(T_{\text{п}} - T_{\text{ср}})t},$$

принимая $c = 0,103$ Дж/(кг · °С); $\rho = 8,94$ г/см³.

Массу тела находим из выражения $m = \rho V$, где объем цилиндра вычисляем по формуле:

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) L.$$

Площадь поверхности цилиндра: $F = \pi DL$.

5. Вывод.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткая теоретическая часть (основные определения и формулы).
3. Схема установки.
4. Таблица результатов опыта и графики.
5. Расчет общего коэффициента теплоотдачи.
6. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется тепловым излучением?
2. Формула для определения количества теплоты передаваемого излучением.
3. Что называется абсолютно черным телом и абсолютно белым?
4. Что такое собственный поток излучения?
5. Условия существования теплового излучения.
6. Что называется конвекцией?
7. Виды конвекции.
8. Уравнение Ньютона, для теплового потока.

Лабораторная работа № 2 «Исследование теплопередачи через однослойную огнеупорную плоскую стенку»

Цель работы: ознакомление с теоретическими основами стационарного теплового режима и экспериментальное определение плотности теплового потока, проходящего через однослойную плоскую стенку.

Общие сведения

В теплопередаче исследуются распределение температуры в системе тел или внутри отдельного тела, а также процесс перехода тепла, связанный с различием температур.

Различают три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводностью называется процесс переноса энергии, происходящий вследствие движения и энергетического взаимодействия микрочастиц (молекул, атомов, ионов, электронов).

Передача тепла теплопроводностью наиболее характерно осуществляется в гомогенных твердых непрозрачных телах. В газах и жидкостях, как правило, одновременно действует теплопередача конвекцией и излучением. В прозрачных телах наряду с теплопроводностью наблюдается излучение.

Тепловое состояние термодинамической системы (тела) характеризуется **температурным полем**, под которым понимается совокупность значений температур для всех точек тела в данный момент времени. Различают одномерное $T = f(x)$, двумерное $T = f(x, y)$ и трехмерное $T = f(x, y, z)$ температурное поле.

Процесс, характеризующийся постоянством температуры во времени, называется **стационарным (установившимся) тепловым режимом**.

Для такого поля можно записать:

$$T = f(x, y, z) = \text{const}; \quad \frac{dT}{d\tau} = 0.$$

Если по объему тела температурное поле неоднородно, то всегда будут существовать микрообъемы, имеющие одинаковые температуры. Совокупность точек тела с одинаковыми значениями температур

образует **изотермические линии или поверхности**. Конфигурация изотермических линий или поверхностей в реальных процессах может быть различной. Поток теплоты вдоль изотермической поверхности отсутствует, так как вдоль нее нет разности температур. Максимальное изменение температуры имеет место в направлении нормали к изотермической поверхности.

Количественной характеристикой того, насколько резко изменяется температура на бесконечно малом участке тела (практически в точке) служит температурный градиент ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$):

$$\text{grad}T = \frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dy} + \frac{dT}{dz} = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right).$$

Температурный градиент – это вектор, нормальный к изотермической поверхности, направленный в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры.

Если температурное поле одномерно, т.е. T изменяется только вдоль одной оси, то

$$\text{grad}T = \frac{dT}{dx}.$$

Интенсивность процесса переноса теплоты теплопроводностью определяется **законом Фурье**. Количество переданной теплоты пропорционально падению температуры, времени и площади сечения, перпендикулярного направлению распространения теплоты:

$$dQ = -\lambda \text{grad}T \cdot dF \cdot d\tau = -\lambda \frac{dT}{dn} dF \cdot d\tau \text{ или } Q^* = -\lambda F \cdot \tau \text{grad}T \text{ (Дж)}.$$

Количество теплоты, проходящее за единицу времени через изотермическую поверхность площадью F , называется **тепловым потоком** (Вт).

$$Q = -\lambda F \cdot \text{grad}T.$$

Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется **плотностью теплового потока** q ($\text{Вт}/\text{м}^2$):

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T.$$

Знак « \leftarrow » показывает, что направления векторов градиента температур и теплового потока противоположны.

Коэффициент теплопроводности $\lambda \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^\circ\text{C}} \right)$ характеризует спо-

собность вещества проводить теплоту и определяется как количество теплоты, которое проходит через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте равном единице. На величину коэффициента теплопроводности оказывают влияние температура, давление, объемная масса материала, пористость и характер распределения пор, влажность, химический состав и структура материала.

Рассмотрим процесс теплопроводности через неограниченную плоскую однослойную стенку толщиной s и коэффициентом теплопроводности λ (постоянный). Температуры на наружной и внутренней поверхностях (T_1 и T_2) известны и постоянны.

Плотность теплового потока по закону Фурье выражается следующим образом:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \frac{dT}{dx}.$$

Температуру в любой точке рассматриваемой плоской стенки можно определить из выражения:

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{s} x,$$

где x – расстояние от поверхности с температурой T_1 до рассматриваемого сечения.

Теплопроводность зависит от температуры и закон распределения температуры по толщине стенки является параболическим. Но обычно зависимость коэффициента теплопроводности от температуры принимают линейной:

$$\lambda = \lambda_0 [1 \pm b(T_1 - T_0)],$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при температуре $T_0 = 0$ °C; b – температурный коэффициент, определяемый опытным путем.

Чаще закон теплопроводности Фурье для рассматриваемого случая записывают:

$$q = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2).$$

Отношение $\frac{\lambda}{s}$ называется **тепловой проводимостью**, а величина обратная ей – **термическим сопротивлением** $\left(R = \frac{s}{\lambda}\right)$.

В связи с вышеизложенным в данной работе ставится задача исследовать характер изменения плотности теплового потока в зависимости от изменения толщины однослойной стенки.

Порядок проведения работы

1. Для проведения лабораторной работы необходимы: экспериментальная установка с нагревателями и приборами электротехнического контроля, датчики температуры, секундомер.

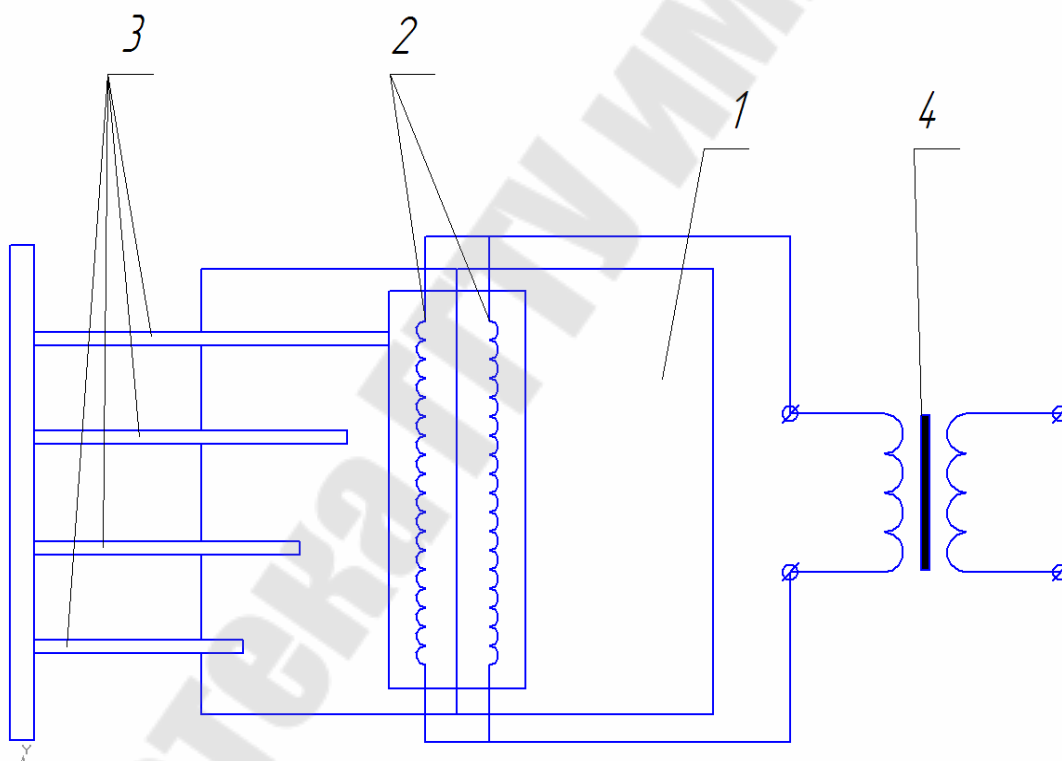


Рис. 1. Схема установки:

1 – Установка из шамотного кирпича с просверленными отверстиями: $s_1 = 0$, $s_2 = 20$, $s_3 = 30$, $s_4 = 40$ (мм); 2 – нагреваемые спирали; 3 – градусники; 4 – понижающий трансформатор

2. Снять показания температуры на различном расстоянии от источника нагрева через каждые 2 мин в течение 20 мин. Результаты записать в виде таблицы:

τ , МИН	t , °C			
	S_1	S_2	S_3	S_4
0				
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				
16				
18				
20				

3. По результатам эксперимента построить графики изменения температуры по времени для каждого s_1, s_2, s_3, s_4 .

4. Рассчитать плотность теплового потока для определенного момента времени ($\tau = 10$ мин) в каждой из точек s_1, s_2, s_3, s_4 , принимая $\lambda_{ш} = 0,835$ (средняя справочная величина) Вт/(м · °C) по формуле:

$$q = \frac{\lambda_{ш}}{s} (T_1 - T_2),$$

где T – температура в точке s_1 .

5. Сделать вывод.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткая теоретическая часть (основные определения и формулы).
3. Схема установки.
4. Таблица результатов опыта и графики.
5. Расчет плотности теплового потока.
6. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под явлением теплопроводности?
2. Что такое температурное поле, какие виды температурного поля Вы знаете?

3. Что такое стационарный тепловой режим?
4. Что такое температурный градиент, тепловой поток, плотность теплового потока; в каких единицах они выражаются?
5. Что характеризует температурный градиент?
6. Сформулируйте основной закон теплопроводности.
7. Что такое коэффициент теплопроводности, его физический смысл?
8. Как характеризуется изменение температуры по толщине однослойной однородной стенки?
9. Что такое тепловая проводимость и термическое сопротивление?
10. Что называется изотермической поверхностью?
11. От чего зависит величина коэффициента теплопроводности?
12. Напишите формулу теплового потока через плоскую однослойную стенку.

Лабораторная работа № 3

Исследование теплопроводности через многослойную плоскую стенку

Цель работы: экспериментальное определение зависимости плотности теплового потока от свойств различных материалов многослойной плоской стенки.

Общие сведения

Свойство материалов сохранять механическую прочность при высоких температурах без нагрузки называется огнеупорностью. Огнеупорность – одно из основных свойств, которое определяет возможность использования огнеупоров в определенных температурных условиях и зависит от химического состава и наличия примесей. Огнеупоры разрушаются в большинстве случаев при температурах ниже их огнеупорности. Чаще разрушение наступает в результате реакций огнеупоров со шлаками и пылью или вследствие недостаточной термостойкости и реже из-за малой механической прочности. Поэтому о пригодности материала для того или иного элемента печи не следует судить только по его огнеупорности.

Способность огнеупорных материалов выдерживать без разрушения резкие колебания температур называется термостойкостью.

Рассмотрим процесс теплопроводности через неограниченную плоскую многослойную стенку.

Для многослойной стенки, имеющей толщины слоев S_1, S_2, \dots, S_n и соответствующие коэффициенты теплопроводности $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ значение плотности теплового потока определяется по формуле:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\sum R},$$

где $\sum R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}$.

Температуру в любой точке многослойной стенки при стационарных условиях можно определить из выражения:

$$T_x = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\sum R} R_x,$$

где R_x – сумма термических сопротивлений той части многослойной стенки, которая находится между плоскостями с температурами T_1 и T_x .

Характер распределения температур в пределах одного слоя подчиняется прямолинейной зависимости; для многослойной стенки с разными коэффициентами λ распределение температур характеризуется ломаной линией, причем чем меньше значение λ , тем круче угол наклона прямой.

Наибольшей теплопроводностью обладают металлы ($\lambda = 20 \dots 400$ Вт/(м · °С)). С увеличением температуры для большинства металлов теплопроводность падает. Точные количественные закономерности изменения коэффициента теплопроводности от концентрации компонентов в сплавах не установлены. Однако известно, что добавление к металлу с высокой теплопроводностью небольших количеств металла с меньшей теплопроводностью приводит к резкому снижению теплопроводности сплава. Изменение структуры металла также приводит к изменению теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности капельных жидкостей колеблется от 0,08 до 0,7 Вт/(м · °С).

В отличие от жидкостей, в газах перемещение молекул ограничивается длиной свободного пробега. Явление чистой теплопроводности в газах наблюдается в очень тонких слоях и состоит во взаимном обмене молекулами и их соударениях между собой. Коэффициент теплопроводности газов невелик ($\lambda = 0,005 \dots 0,5$ Вт/(м·°С)). Исключение составляют гелий и водород. Их теплопроводность в 5–10 раз больше из-за малой молекулярной массы. Зависимость коэффициента теплопроводности газов от температуры описывается формулой:

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Величина коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов находится в пределах 0,02...3,0 Вт/(м·°С) и зависит от структуры материала, его пористости и влажности. Эти границы условные, так как характеризуют совместный перенос теплоты теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением в порах и капиллярах. Так, например, если поры и капилляры материала заполнены водой, то коэффициент теплопроводности становится значительно больше теплопроводности материала, так как при капиллярном пере-

мещении жидкости большое количество теплоты передается благодаря высокой теплоемкости воды.

Порядок проведения работы

1. Для проведения лабораторной работы необходима экспериментальная установка (рис. 1), которая состоит из: 1 – нагревательная печь; 2 – многослойная стенка: (2а) – шамотный кирпич; (2б) – асбокартон; (2в) – пластик, с просверленными на определенном уровне отверстиями); 3 – градусники.

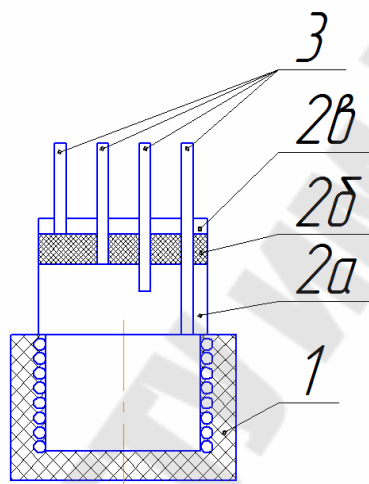


Рис. 1. Схема установки

Снять показания температуры на различном расстоянии от источника нагрева через каждые 2 мин в течение 20 мин. Результаты записать в виде таблицы:

τ , мин	t , °C			
	Шамот			Асбест S3
	S0	S1	S2	
0				
2				
4				
6				
8				
10				
12				

τ, мин	t, °C			
	Шамот			Асбест S3
	S0	S1	S2	
14				
16				
18				
20				

3. По результатам эксперимента построить графики изменения температуры по времени для каждого слоя.

4. Рассчитать плотность теплового потока для определенного момента времени в каждой из точек S₁, S₂, S₃, принимая λ_ш = 0,835 Вт/(м°С), λ_{асб} = 0,2 Вт/(м°С) по формуле:

$$q = \frac{T_0 - T_n}{\sum R} = \frac{T_0 - T_n}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}}$$

где T₀ – температура в точке S₀.

5. Сделать вывод.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткая теоретическая часть (основные определения и формулы).
3. Схема установки.
4. Таблица результатов опыта и графики.
5. Расчет плотности теплового потока.
6. Вывод.

Лабораторная работа № 4 Рекуперативные теплообменники

Цель работы: ознакомиться с типами, конструкцией и принципом действия рекуператоров.

Общие сведения

Конвективный теплообмен представляет собой сложный процесс переноса теплоты в жидкостях и газах, обусловленный совместным действием конвекции и теплопроводности. В микрообъемах имеет место процесс переноса тепла теплопроводностью, а на макроуровне – за счет перемешивания. На формирование и интенсивность тепловых потоков между стенкой и жидкостью влияют физические свойства жидкости и режим ее движения, размеры и положение тела, обтекаемого жидкостью. Из теплофизических свойств жидкости наибольшее влияние на теплообмен оказывают: плотность, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность. Кроме того, для реальной жидкости должна учитываться вязкость жидкости, т.е. свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части относительно другой. Вязкость зависит от температуры и давления и характеризуется коэффициентом вязкости.

Конвекция – особый вид передачи теплоты при непосредственном контакте движущейся жидкости или газа с твердой поверхностью при наличии между ними разности температур. Таким образом, конвекция непосредственно связана с движением среды относительно поверхности, или наоборот.

В зависимости от природы возникновения различают конвективный теплообмен при вынужденном и свободном движении жидкости. Свободное движение происходит вследствие разности температур, вызывающих разность плотностей жидкости или газа. Если движение поддерживается искусственно, за счет внешних побудителей (насос, вентилятор и т.п.), то имеет место вынужденная конвекция.

Для процессов теплоотдачи характер движения жидкости определяет механизм переноса теплоты. Перенос теплоты при ламинарном движении в направлении нормали к поверхности стенки осуществляется теплопроводностью. При турбулентном характере движения жидкости в тонком слое у поверхности течение жидкости замедляется вследствие наличия вязкого трения. Этот слой принято называть по-

граничным или слоем Прандтля. Пограничный слой представляет собой область течения вязкой теплопроводной жидкости, которая характеризуется малой толщиной по сравнению с продольными размерами области и большим поперечным градиентом скорости, температуры и концентрации, изменением которых и обуславливаются процессы переноса количества движения, теплоты и вещества.

Различают гидродинамический, тепловой и диффузионный пограничные слои. Гидродинамический пограничный слой представляет собой область потока, непосредственно прилегающую к поверхности твердого тела, в которой происходят наиболее существенные изменения скорости. Тепловой и диффузионный пограничные слои характеризуют область потока, в которой наблюдаются наибольшие градиенты температуры или концентрации компонентов смеси. В самом пограничном слое движение может быть как ламинарным, так и турбулентным, но всегда существует ламинарный подслой. Термическое сопротивление этого слоя оказывает существенное влияние на интенсивность теплообмена, так как перенос теплоты через ламинарный слой осуществляется только теплопроводностью.

Согласно уравнению Ньютона полное количество тепла, передаваемого от одной среды к другой в единицу времени пропорционально разности температур этих сред ΔT и площади поверхности стенки F (Вт):

$$Q = K\Delta TF,$$

где K – коэффициент пропорциональности теплопередачи, характеризующий интенсивность процесса теплообмена в рекуператоре, Вт/(м²°С); ΔT – средняя (по всей поверхности нагрева) разность температур между дымовыми газами и воздухом, °С; F – поверхность нагрева, через которую происходит передача тепла от дымовых газов к воздуху (газу), м².

Коэффициент K обратно пропорционален сумме термических сопротивлений стенки и теплоотдачи на ее поверхностях:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячей среды к стенке; S – толщина стенки; λ – коэффициент теплопроводности стенки; α_2 – коэффициент теплоотдачи от горячей стенки к нагреваемой среде.

Коэффициент теплоотдачи α представляет собой количество теплоты, передаваемого в единицу времени единицей поверхности при разности температур между поверхностью и средой в один градус.

Коэффициент теплопередачи рекуператора является основной характеристикой, определяющей эффективность его работы. Он зависит от скорости движения теплоносителей, разности температур между ними, материала и толщины разделяющей их стенки.

Рекуператор представляет собой теплообменный аппарат, работающий в условиях стационарного теплового состояния, когда тепло постоянно передается от остывающих дымовых газов к нагреваемому воздуху (газу) через стенку.

В рекуператорах движение газообразной среды может быть **противоточное, перекрестное** и **прямоточное**. Принято схему движения рассматривать по ходу дыма.

При противоточном движении конечная температура воздуха T_B^k (температура подогрева воздуха) может быть выше конечной температуры дымовых газов T_d^k , чего никогда не может быть при прямоточной схеме движения.

При противотоке температура стенки рекуператора может быть значительно выше, чем при прямотоке. Поэтому более эффективную противоточную схему используют в керамических и металлических рекуператорах при относительно невысоких температурах отходящих дымовых газов. Прямоточную схему применяют для металлических рекуператоров в том случае, если температура дымовых газов настолько велика, что возникает опасность в отношении стойкости материала рекуператора.

Как при противотоке, так и при прямотоке температура дымовых газов и воздуха изменяется по поверхности нагрева, что обуславливает изменение разности температур дымовых газов и воздуха. Поэтому характерной является средняя разность температур по всей поверхности нагрева ΔT_{cp} .

Рекуператоры выполняются из металла и керамических материалов.

Металл рекуператоров работает в условиях высоких температур при динамическом и окисляющем действии дымовых газов. Для изготовления рекуператоров применяют легированные стали и чугуны.

В радиационных металлических рекуператорах значительная толщина слоя излучающих газов и тепловое излучение дымовых газов

является определяющим видом теплопередачи на дымовой стороне рекуператора.

Керамические рекуператоры работают при весьма высоких температурах, материал рекуператоров должен обладать достаточной огнеупорностью, хорошей термостойкостью, высокой температурой начала деформации при нагрузке, высокой теплопроводностью, необходимыми механическими свойствами, низким коэффициентом линейного расширения и быть достаточно стойким против воздействия железистых шлаков.

Преимущества металлических рекуператоров по сравнению с керамическими следующие:

а) более высокий коэффициент теплопередачи и большая удельная поверхность нагрева ($\text{м}^2/\text{м}^3$); это обеспечивает лучшую компактность металлических рекуператоров и, следовательно, меньший объем при одинаковой общей поверхности нагрева;

б) нет необходимости в глубоких подземных борах, можно размещать рекуператоры над печами;

в) улучшенная герметичность.

Сварные металлические рекуператоры можно применять для подогрева газа.

Недостатком металлических рекуператоров является их малая стойкость против воздействия высоких температур.

Порядок проведения лабораторной работы

Для проведения лабораторной работы нужна установка (рис. 1), состоящая из: 1 – нагревательного элемента, 2 – кварцевой трубки, 3 – медных трубок, 4 – резервуара с водой.

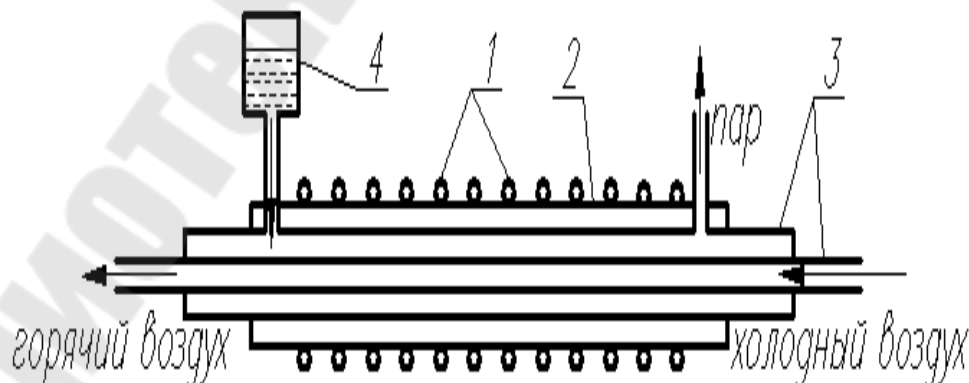


Рис. 1

На примере работы установки необходимо ознакомиться с принципом действия противоточного рекуператора.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема установки.
4. Вывод.

Вопросы

1. Что называется конвекцией?
2. Что представляет собой рекуператор?
3. Напишите уравнение Ньютона для передачи тепла конвекцией.
4. Напишите уравнение коэффициента пропорциональности теплопередачи. Что он характеризует?
5. Что представляет собой коэффициент теплоотдачи?
6. От чего зависит коэффициент теплопередачи?
7. Назовите типы рекуператоров.
8. В чем преимущества и недостатки металлических рекуператоров?
9. Назовите преимущества и недостатки керамических рекуператоров.

Пример выполнения лабораторной работы № 3

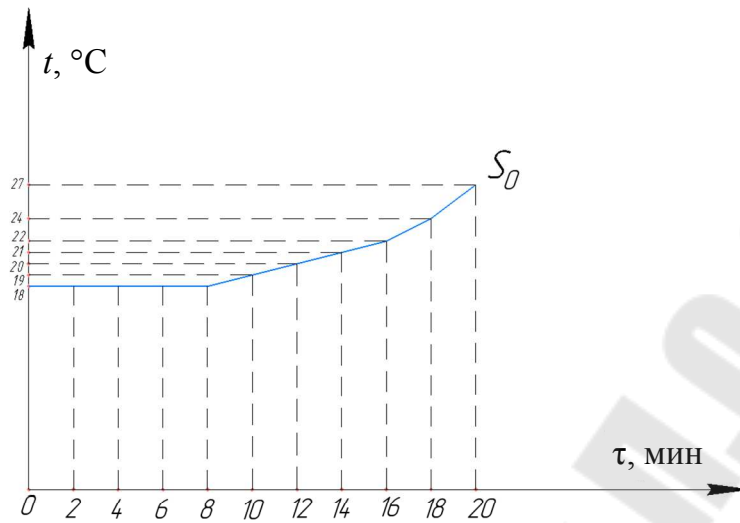


Рис. 1

$$\tau = 10 \text{ МИН}$$

$$q = \frac{T_0 - T_n}{\sum R} = \frac{T_0 - T_n}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}};$$

$$\lambda_{\text{III}} = 0,835 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^{\circ}\text{C}};$$

$$q_1 = \frac{19 - 22}{\frac{20}{0,835} + \frac{30}{0,835} + \frac{40}{0,2}} = -0,012 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$q_2 = \frac{19 - 24,5}{\frac{20}{0,835} + \frac{30}{0,835} + \frac{40}{0,2}} = -0,021 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$q_3 = \frac{19 - 27}{\frac{20}{0,835} + \frac{30}{0,835} + \frac{40}{0,2}} = -0,292 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Вывод: экспериментально определены зависимости плотности теплового потока от свойств различных материалов многослойной плоской.

Литература

1. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 366 с.

3. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. – М. : Академкнига, 2002. – 455 с..

4. Экономия энергоресурсов в промышленных технологиях. справ.-метод. пособие / Авторы – составители; Г. Я. Вагин, Л. В. Дудникова, Е.А. Зенютнич, А.Б. Лоскутов, Е.Б. Солнцев; под ред. С. Р. Солнцева; НГТУ, НИЦЭ – Н. Новгород, 2001. – 296.

5. Баскаков, А. П. Теплотехника / А. П. Баскаков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 244 с.

Практическая часть

Таблица 1

$\tau, \text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$
0	304
20	279
40	251
60	224
80	201
100	180
120	163
140	149
160	136
180	125
200	115
220	106
204	100

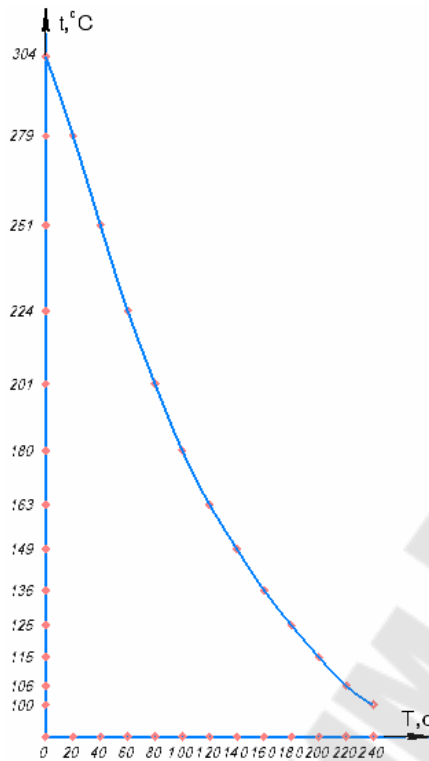


Рис. 2. График изменения температуры от времени

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) L = \left(\frac{3,14 \cdot 9,9^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 4,7^2}{4} \right) \cdot 199 = 0,000011859 \text{ м}^3;$$

$$m = \rho V = 8940 \cdot 0,000011859 = 0,106 \text{ кг};$$

$$F = \pi \cdot D \cdot L = 3,14 \cdot 9,9 \cdot 199 = 6189 \text{ мм}^2 = 61,89 \text{ см}^2 = 0,006189 \text{ м}^2;$$

$$\lambda_0 = \frac{cm(T_1 - T_2)}{F(T_{\text{п}} - T_{\text{ср}})t} = \frac{0,103 \cdot 0,106 \cdot (720 - 240)}{0,006189 \cdot (450 - 40,6) \cdot 210} = 0,011 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Вывод: коэффициент теплоотдачи зависит от коэффициента излучения, массы тела и разности температуры и площади поверхности тела.

Таблица 1

τ, мин	t, °C			
	S ₀	Шамот		Асбест S ₃
		S ₁	S ₂	
0	18	20	19	18
2	18	20	19	40
4	18	20	19,5	50

Окончание табл. 1

τ , МИН	t , °С			
	S_0	Шамот		Асбест S_3
6	18	20	20	63
8	18	20,5	22,5	80
10	19	22	24,5	95
12	20	23	29	113
14	21	25	34	126
16	22	27	38	43
18	24	29	44	158
20	27	33	50	172

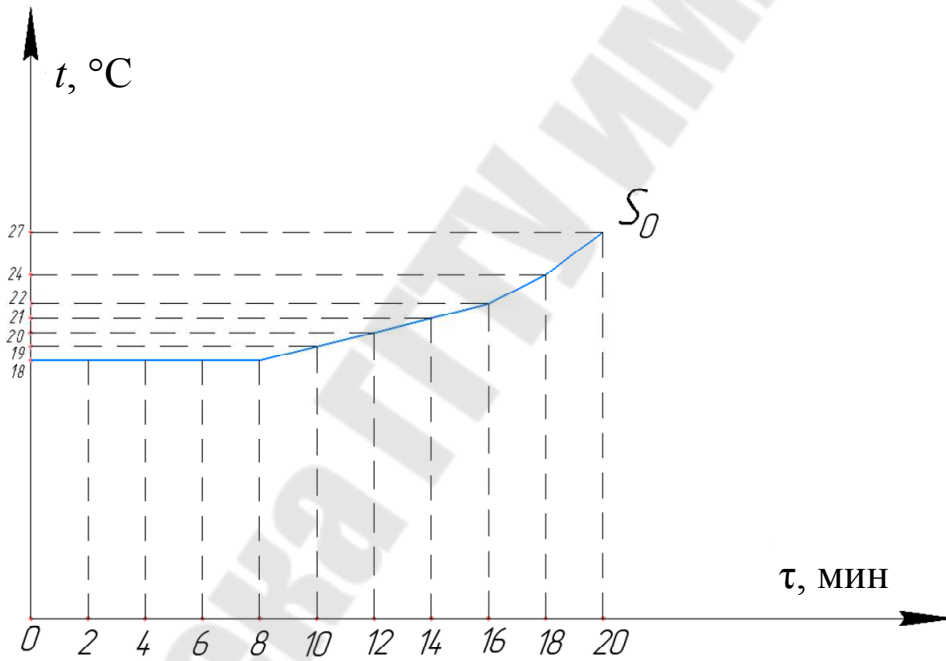


Рис. 3

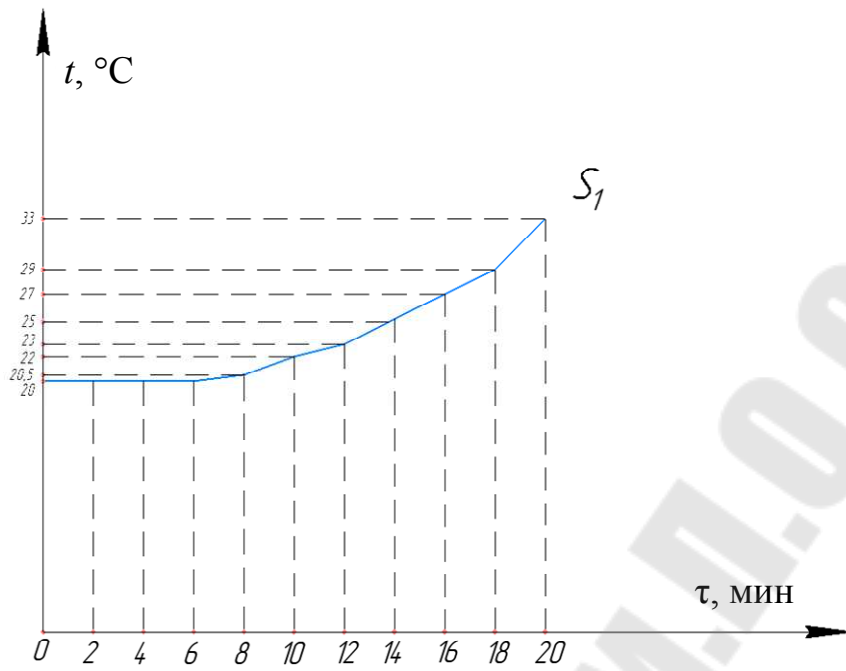


Рис. 4

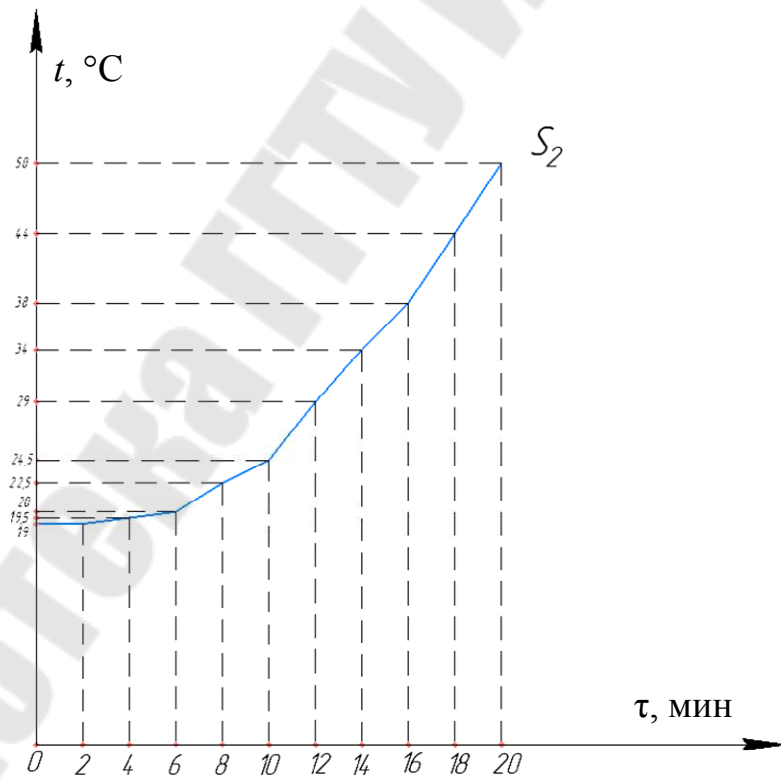


Рис. 5

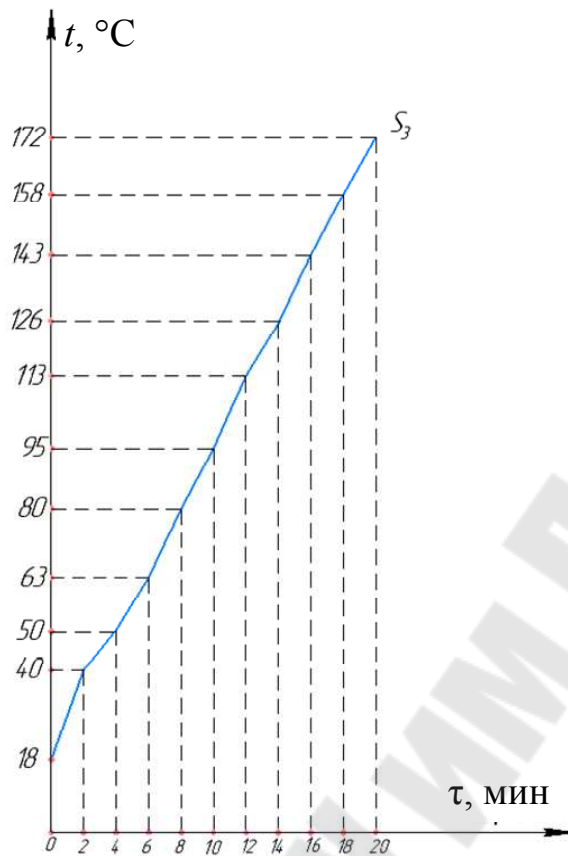


Рис. 6

$$\tau = 10 \text{ МИН}$$

$$q = \frac{T_0 - T_n}{\sum R} = \frac{T_0 - T_n}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}};$$

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,835 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^\circ\text{С}};$$

$$q_1 = \frac{19 - 22}{\frac{20}{0,835} + \frac{30}{0,835} + \frac{40}{0,2}} = -0,012 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$q_2 = \frac{19 - 24,5}{\frac{20}{0,835} + \frac{30}{0,835} + \frac{40}{0,2}} = -0,021 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$q_3 = \frac{19 - 95}{\frac{20}{0,835} + \frac{30}{0,835} + \frac{40}{0,2}} = -0,292 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Вывод: экспериментально определены зависимости плотности теплового потока от свойств различных материалов многослойной плоской стенки.

Ровин Леонид Ефимович

**ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ
В МЕТАЛЛУРГИИ**

**ПРАКТИКУМ
по выполнению лабораторных работ
для слушателей специальности
переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое
производство и материалобработка»
заочной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 02.02.21.

Рег. № 8Е.
<http://www.gstu.by>