

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИРКУТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к лабораторным работам
по курсу «Теплотехника»

Иркутск, 2014

УДК 621.4

Рецензент:

Доцент кафедры теплоэнергетики Иркутского национального исследовательского государственного технического университета, канд. техн. наук, доцент В.А. Бочкарев

Теплотехника: метод. указания к лаб. раб. / Авт.-сост. В.В. Нечаев, В.Д. Очиров. – Иркутск: ФГБОУ ВПО ИрГСХА, 2014. – 50 с.

Методические указания подготовлены на основе требований Федеральных государственных образовательных стандартов и программы дисциплины «Теплотехника» для студентов аграрных вузов. Методические указания предлагаются в качестве пособия к лабораторным занятиям по курсам:

- «Теплотехника» для студентов направления подготовки 110800 Агроинженерия (квалификация (степень) «бакалавр»);
- «Теплотехника» для студентов направления подготовки 190600 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (квалификация (степень) «бакалавр»);
- «Основы термодинамики», «Техническая термодинамика», «Тепломассообмен» для студентов направления подготовки 140100 Теплоэнергетика и теплотехника (квалификация (степень) «бакалавр»).

© Нечаев В.В., Очиров В.Д., 2014.

© Издательство ИрГСХА, 2014.

ВВЕДЕНИЕ

Теплотехника – дисциплина, изучающая методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принцип действия и устройство оборудования для проведения этих процессов.

Теплотехника как учебная дисциплина наиболее тесно связана с такими смежными дисциплинами, как математика, физика и химия, знания, которых используются при ее изложении. В свою очередь, сведения, полученные студентами из курса теплотехники, необходимы для изучения ими дисциплин профессионального цикла и будущей профессиональной деятельности.

Настоящие методические указания включают пять разделов, охватывающих восемь лабораторных работ: термодинамика, теплопередача, парогенераторы, теплообменники и холодильные установки. Для каждого из разделов подобраны работы, позволяющие уяснить физический смысл важнейших термодинамических и тепловых процессов.

Общие методические указания. Перед выполнением работы студент обязан ознакомиться с методикой выполнения работы, используя рекомендуемую литературу, проработать указанные вопросы и заготовить форму таблицы для записей необходимых величин при проведении эксперимента.

Перед выполнением работы студент обязан ответить преподавателю на вопросы, указанные в начале каждой лабораторной работы. Студенты, не подготовившиеся к занятиям, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

При выполнении работы нужно строго соблюдать правила по технике безопасности. После окончания работы студент обязан составить отчет и защитить его перед преподавателем.

Правила техники безопасности. Без разрешения преподавателя или ассистента не включать электроприборы. Запрещается прикасаться к токоведущим частям.

При работе в котельной:

- не ходить по котельной в промежутках между замерами;
- не касаться горячих трубопроводов;
- не включать и не выключать насосы, вентиляторы и другое оборудование без указания руководителя;
- не трогать движущиеся части насосов, вентиляторов, дымососов;
- не включать и не выключать приборы, установленные у котла;
- не открывать и не закрывать задвижки и вентили котла.

"ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ, ЭНТАЛЬПИИ И ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ВОЗДУХА

(2 ч)

Назначение работы - экспериментальное определение объемной изобарной теплоемкости воздуха, позволяющее рассчитывать все виды теплоемкостей, зависимость их от температуры, а также родственные им величины: внутреннюю энергию, энтальпию и показатель адиабаты.

Вопросы, подлежащие проработке:

1. Физическая сущность различных теплоемкостей и их взаимосвязь, зависимость их от температуры.
2. Физическая сущность внутренней энергии и энтальпии.
3. Понятие о молекулярной массе, газовой постоянной и показателе адиабаты

Задания:

1. Определить экспериментально среднюю объемную теплоемкость воздуха при $P = \text{Const}$ в заданном интервале температур.
2. По полученным экспериментальным данным рассчитать для воздуха:
 - а) массовую среднюю изобарную теплоемкость;
 - б) массовую среднюю изохорную теплоемкость;
 - в) показатель адиабаты;
 - г) энтальпию;
 - д) внутреннюю энергию.
3. Сравнить полученные данные с табличными.
4. Составить отчет о выполненной работе.

Описание опытной установки и проведение опыта.

Опытная установка показана на рисунке 1.1, там же приведена спецификация. Перед включением калориметра в электрическую сеть необходимо включить воздушный насос и пустить воздух через калориметр. Количество воздуха, проходящего через калориметр, регулируется вентилем, установленным на воздухоподводящей трубке.

Электрический ток, проходящий через электронагреватель, регулируется калориметром.

Силу тока и напряжение замеряют соответственно амперметром и вольтметром. Динамический напор воздуха определяют микроа-

нометром, подсоединенным к трубке Прандтля.

После включения насоса включают электрический ток и устанавливают ЛАТРОм указанное преподавателем напряжение. Через каждые 10 мин записывают показания приборов в таблицу, заготовленную заранее.

Режим считается установившимся, когда при последних замерах $t_{вх}$ и $t_{вых}$ будут одинаковыми. После этого переходят на следующий режим, указанный преподавателем. После каждого режима в таблице проводят черту.

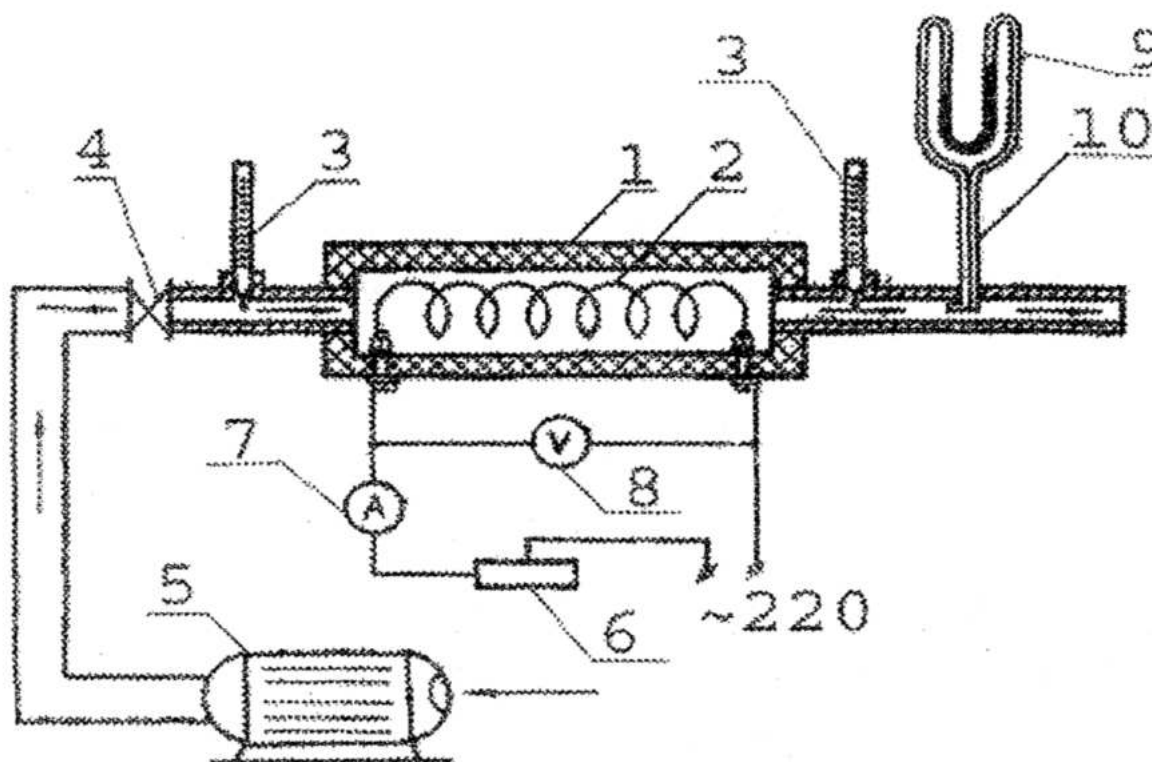


Рис.1.1 Схема установки для определения теплоемкости
 1 – проточный калориметр; 2 - электроспираль; 3 – термометр;
 4 – вентиль; 5 – нагнетатель воздуха; 6 – реостат; 7 – амперметр;
 8 – вольтметр; 9 – микроманометр; 10 – трубка Прандтля

Таблица 1.1

Показатели замеров и результаты расчета

Измерения	J	U	t_{ex}	$t_{вых}$	h	$C_{pt_{ex}}^{t_{вых}}$	$C_{pt_{ex}}^{t_{вых}}$	$C_{vt_{ex}}^{t_{вых}}$	k	h	u
	А	В	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	мм. в.ст	$\frac{кДж}{м^3 K}$	$\frac{кДж}{кг \cdot K}$	$\frac{кДж}{кг \cdot K}$		$\frac{кДж}{кг}$	$\frac{кДж}{кг}$
1											
2											
3											
4											
5											

Обработка результатов испытания.

1. Среднюю изобарную теплоёмкость воздуха определяют по формуле:

$$C_{pt_{ex}}^{t_{вых}} = \frac{JU}{v_0 \Delta t 1000} \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К}), \quad (1)$$

где $C_{pt_{ex}}^{t_{вых}}$ - средняя объёмная изобарная теплоёмкость воздуха в интервале температур от t_{ex} до $t_{вых}$; $\Phi = JU$, Вт = Дж/с - мощность электронагревателя; v_0 - секундный объём воздуха, приведенный к нормальным условиям, $\text{м}^3 / \text{с}$; определяется из уравнения:

$$v_{t_{cp}} = \frac{273 + t_{cp}}{273} v_0, \quad (2)$$

откуда:

$$v_0 = v_{t_{cp}} \frac{273}{273 + t_{cp}} \text{ м}^3 / \text{с} \quad (3)$$

Здесь $v_{t_{cp}}$ - объём воздуха при средней его температуре;

$$t_{cp} = \frac{t_{ex} + t_{вых}}{2}, \quad (4)$$

$$v_{t_{cp}} = \frac{\pi d^2}{4} W_{t_{cp}} \text{ м}^3 / \text{с}, \quad (5)$$

где $d=0,026$ м - внутренний диаметр калориметра; $W_{t_{cp}}$ - скорость воздуха при его средней температуре t_{cp} .

$$W_{t_{cp}} = \sqrt{\frac{2gP_g}{\gamma_{t_{cp}}}} \text{ м/с}, \quad (6)$$

где $P_g = h(\gamma_{жс} - \gamma_{t_{cp}}) \text{ Н/м}^2$ - динамический напор; h - высота столба жидкости, уравновешивающей динамический напор, замеренный с помощью трубки Прандтля и микроманометра, м; $\gamma_{жс}$ - удельный вес жидкости в микроманометре, Н/м^3 . Для воды $\gamma_{жс} = 9810 \text{ Н/м}^3$, для спирта $\gamma_{жс} = 7900 \text{ Н/м}^3$

$\gamma_{t_{cp}} = \gamma_0 \frac{273}{273 + t_{cp}} \text{ Н/м}^3$ - удельный вес воздуха при его средней температуре

$$t_{cp} = \frac{t_{ex} + t_{вых}}{2};$$

$\gamma_0 = 12,6 \text{ Н/м}^3$ - удельный вес воздуха при нормальных условиях;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение силы тяжести; $\Delta t = t_{вых} - t_{вх}$ - разность температур воздуха на входе и выходе из калориметра.

2. Среднюю массовую изобарную теплоемкость $C_{P t_{ex}}^{t_{вых}}$ определяют из соотношения массовой и объемной теплоемкостей.

$$C_{P t_{ex}}^{t_{вых}} = \frac{C_{P t_{ex}}^{t_{вых}}}{\rho_0}, \quad (7)$$

где $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ - плотность воздуха при нормальных условиях.

3. Среднюю массовую изохорную теплоемкость определяют из уравнения Майера

$$C_{P t_{ex}}^{t_{вых}} - C_{V t_{ex}}^{t_{вых}} = R, \quad (8)$$

откуда:

$$C_{V t_{ex}}^{t_{вых}} = C_{P t_{ex}}^{t_{вых}} - R; \quad R = 0,287 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

4. Показатели адиабаты для воздуха определяем из уравнения:

$$K = \frac{C_{P t_{ex}}^{t_{вых}}}{C_{V t_{ex}}^{t_{вых}}} \quad (9)$$

5. Энтальпия воздуха:

$$h = C_{P t_{ex}}^{t_{вых}} (t_{вых} - 0^\circ \text{C}) = C_{P t_{ex}}^{t_{вых}} \cdot t_{вых}, \text{ кДж/кг} \quad (10)$$

6. Внутренняя энергия воздуха:

$$u = C_{\nu t_{\text{вых}}}^{t_{\text{вых}}} (t_{\text{вых}} - 0^{\circ}\text{C}) = C_{\nu t_{\text{вых}}}^{t_{\text{вых}}} \cdot t_{\text{вых}}, \text{ кДж/кг} \quad (11)$$

После расчета C_p и C_v по опытным данным следует сравнить их с литературными табличными данными.

Отчет должен содержать:

1. Схему опытной установки с кратким описанием ее.
2. Описание проведения опыта.
3. Подробный расчет всех величин.
4. Таблицу наблюдений и результатов расчета (можно объединить).

Лабораторная работа №2

"ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТРУБЫ"

(2 ч).

Цель работы - углубление знаний по теории теплопроводности, а также знакомство с экспериментальными исследованиями по определению коэффициентов теплопроводности различных материалов и тепловых сопротивлений.

Вопросы, подлежащие проработке до выполнения работы:

1. Физическая сущность процесса теплопроводности.
2. Уравнения стационарного температурного поля (одно-, двух- и трехмерного).
3. Уравнения нестационарного температурного поля (одно-, двух- и трехмерного).
4. Температурный градиент.
5. Уравнение Фурье.
6. Коэффициент теплопроводности, его физический смысл и зависимость от температуры для различных тел.
7. Тепловой поток, его физический смысл и уравнения для однослойной и многослойной плоской стенки, а также для цилиндрической стенки.
8. Уравнение общего количества теплоты.
9. Плотность теплового потока.
10. Тепловая проводимость стенки, тепловое сопротивление и температурный напор.
11. Закон изменения температуры в плоских и цилиндрических стенках.

Задания:

1. Найти значение коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления исследуемого материала экспериментальным путем.
2. Определить изменение коэффициента теплопроводности тела в зависимости от изменения его температуры.
3. Составить отчет о выполненной лабораторной работе.

Описание опытной установки и проведение опыта. Интенсивность переноса теплоты в твердом теле определяется температурным градиентом и значением коэффициента теплопроводности. Последний является физическим параметром тела. Он характеризует способность материала проводить теплоту. Для различных материалов коэффициент теплопроводности различен и зависит от структуры, объемного веса, влажности и температуры. Значение коэффициента теплопроводности определяется опытным путем. Одним из методов его определения является так называемый метод цилиндра (трубы).

Исследуемый материал, в частности асбест, в виде цилиндрического слоя нанесен на поверхность круглой трубы, которая изнутри равномерно обогревается электрической спиралью. При установившемся тепловом состоянии системы все количество теплоты, которое выделяется внутри трубы в час, проходит через цилиндрический слой материала и определяется следующим уравнением:

$$\Phi = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт} \quad (12)$$

Здесь $\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ - коэффициент теплопроводности исследуемого материала (асбеста); l - длина трубы, м; d_1 и d_2 - внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя материала, м; t_1 и t_2 - средние температуры внутренней и внешней поверхностей цилиндрического слоя материала, °С.

Если известны l, d_1, d_2 и измерены t_1, t_2 и Φ , то из уравнения (12) можно определить значение коэффициента теплопроводности, характеризующего свойства цилиндрической стенки.

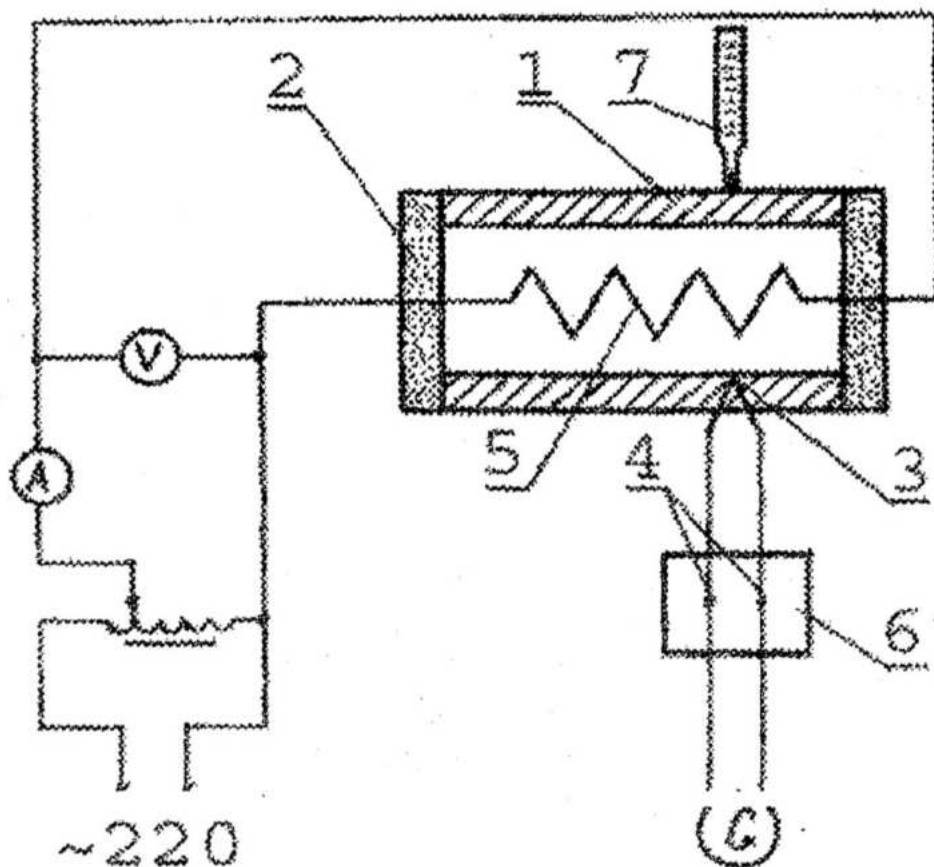


Рис.2.1

Схема установки для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом трубы:

- 1 – исследуемая изоляция; 2 – тепловая защита торцов; 3 – горячий спай термопары; 4 – холодный спай термопары;
5 – электронагреватель; 6 – коробка холодного спая; 7 - термометр

Опытная установка состоит из трубы длиной $l = 440$ мм. Изоляционный цилиндрический слой материала имеет внутренний диаметр $d_1 = 116$ мм, наружный $d_2 = 136$ мм. Материал - асбест. Внутри трубы заложен электрический нагреватель, создающий равномерный обогрев. Сила тока регулируется лабораторным автотрансформатором, а расходуемая мощность измеряется с помощью амперметра и вольтметра.

Температуры t_1 и t_2 замеряются соответственно термопарой и термометром.

Исходное расчетное уравнение (12) справедливо для одномерного теплового потока. Выполнение этого условия обеспечивается в опытной установке выбором длины трубы, значительно большей, чем ее внешний диаметр.

Кроме того, торцы трубы защищены тепловой изоляцией. Электрический нагреватель имеет равномерно распределенную по длине трубы оболочку, а измерители температуры установлены в средней части трубы.

Проведение опытов и обработка результатов. После изучения материала и ознакомления с опытной установкой необходимо изготовить форму протокола для записей наблюдений и проверить правильность включения измерительных приборов. После проверки преподавателем схемы можно приступить к проведению опыта.

Включается ток, через каждые 5...10 мин производится запись всех показаний измерительных приборов до наступления установившегося теплового состояния системы. Опыт считается законченным после того, как температуры t_1 и t_2 остаются неизменными в течение нескольких замеров.

При обработке материалов испытания нужно использовать только те данные, которые получены при установившемся тепловом режиме системы. Для расчета принимают средние данные при установившемся тепловом режиме.

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала вычисляют по следующему уравнению теплопроводности:

$$\lambda = \frac{\Phi \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l(t_1 - t_2)}, \text{ Вт/м} \cdot (\text{м} \cdot \text{К}) \quad (13)$$

Подведенная мощность Φ , или теплота, выделяемая в единицу времени, определяется по расходу электроэнергии, измеряемому ваттметром или с помощью амперметра и вольтметра. В этом случае $\Phi = JU$, Вт.

Полученные из уравнения (13) значения коэффициента теплопроводности следует относить к средней температуре исследуемого материала

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Зная λ , можно определить тепловое сопротивление стенки $\frac{\delta}{\lambda}$, где δ - толщина стенки.

Если имеется несколько значений λ при разных температурах, т.е. разных тепловых режимах, то можно построить график зависимости коэффициента теплопроводности от температуры исследуемого материала.

Таблица 2.1

Данные, полученные при проведении эксперимента

№ опыта	J	U	t_1	t_2	Δt	t_{cp}	Φ	λ	δ / λ
	А	В	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	Вт	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	$\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$
1									
2									
3									
4									
5									

Отчет должен содержать

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Протокол записи показаний приборов.
4. Обработку результатов опыта.
5. Таблицу результатов опыта при установившемся режиме.
6. Сравнение полученных данных с литературными.

Лабораторная работа № 3

"ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА

(2 ч).

Цель работы - изучение процесса теплообмена между поверхностью твердого тела и окружающей средой при свободном ее движении.

1. Физическая сущность коэффициента теплоотдачи для данного конкретного случая.
2. Способы определения коэффициента теплоотдачи.
3. Физический смысл α_k и α_d
4. Закон Кирхгофа. Степень черноты газов и твердых тел.
5. Количество теплоты, излучаемое газами.

Задание:

1. Определить экспериментальным путем коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха в неограниченном пространстве.
2. Определить расчетным путем коэффициенты теплоотдачи соприкосновением α_k и лучеиспусканием α_d .
3. Составить отчет о выполненной работе.

Описание опытной установки. В горизонтально установленной трубе

установлен электрический нагреватель, в цепь которого включены амперметр, вольтметр и реостат. Температура на поверхности трубы измеряется в четырех точках с помощью термопар, подключенных к гальванометру через переключатель. Холодные спаи термопар помещены в термостат.

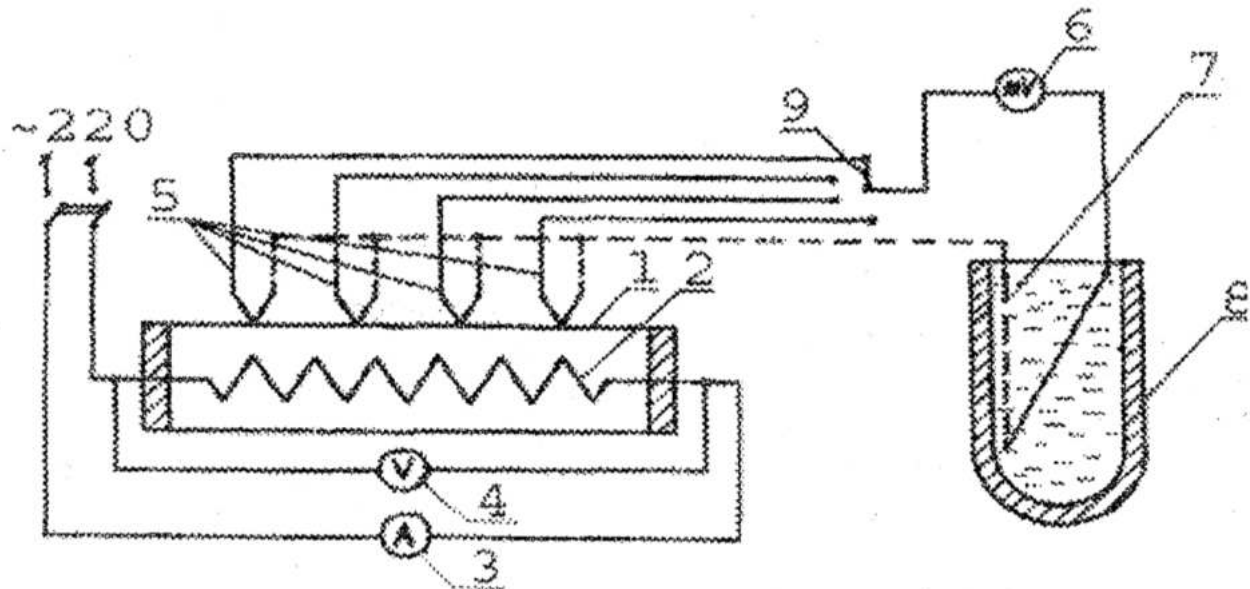


Рис.3.1 Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха:

- 1 – металлическая труба; 2 – электронагреватель; 3 – амперметр;
 4 – вольтметр; 5 – термопары; 6 – милливольтметр; 7 – холодный спай термопар;
 8 – коробка холодных спаев термопар; 9 – переключатель термопар

Количество теплоты, которым обменивается тело с окружающей средой в единицу времени, или тепловой поток, согласно закону Ньютона, пропорционально разности температур между поверхностью тела t_n и окружающей средой t_c и величине поверхности тела A , т.е.

$$\Phi = \alpha(t_n - t_c) \cdot A, \text{ Вт} \quad (14)$$

Коэффициент пропорциональности α - называется коэффициентом теплоотдачи и характеризует интенсивность теплообмена между телом и окружающей средой.

Коэффициент теплоотдачи равен тепловому потоку, передаваемому 1 м^2 поверхности тела при разности температур между поверхностью тела и средой в один градус. Размерность коэффициента теплоотдачи $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов, определяющих условия взаимодействия тела с окружающей средой (скорость и характер движения среды, ее термодинамические свойства,

размеры и конфигурации тела, температуры поверхности тела и окружающей среды и т.д.).

Количество теплоты, которым обмениваются поверхность тела и окружающая среда, складывается из теплоты, передаваемой непосредственным соприкосновением среды с поверхностью тела (конвекция, теплопроводность), и из теплоты, передаваемой путем теплового излучения. В соответствии с этим общий коэффициент теплоотдачи равен сумме коэффициента теплоотдачи соприкосновением α_k и коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием α_n . т.е.:

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_k \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (15)$$

Порядок проведения опытов. Включается электрический нагреватель, установка прогревается до стационарного теплового режима, о наступлении которого свидетельствуют установившиеся показания гальванометра. При стационарном тепловом режиме производится несколько замеров по всем приборам с интервалом в 5 мин. Показания замеров необходимо внести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Данные, полученные при проведении эксперимента

№ опыта	Время	Температура, °C				I, A	V, B	Φ, Вт
		1	2	3	4			
1								
2								
3								
4								
5								

Обработка результатов опыта. Подсчитывают средние значения измеренных величин при установившемся режиме. Общую мощность нагревателя определяют по формуле $\Phi = IU$. Температуру поверхности трубы определяют как среднюю в четырех точках:

$$t_n = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad (16)$$

Температуру окружающей среды t_c замеряют комнатным термометром. Поверхность трубы определяют по формуле:

$$A = \pi d_n l, \quad (17)$$

где наружный диаметр трубы $d_n = 0,089$ м, длина трубы $l = 0,415$ м.

Зная все величины в формуле /14/, определяем α

$$\alpha = \frac{\Phi}{F(t_n - t_c)}, \text{ Вт } / (\text{ м }^2 \cdot \text{ К }),$$

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_k, \text{ откуда } \alpha_k = \alpha - \alpha_n$$

Находим коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_n из уравнения:

$$\alpha_n = \frac{\Phi_n}{A(t_n - t_c)}, \text{ Вт } / (\text{ м }^2 \cdot \text{ К }) \quad (18)$$

Мощность лучеиспускания определяем по формуле:

$$\Phi_n = C \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot A, \text{ Вт } , \quad (19)$$

где $C = \varepsilon C_0$ - коэффициент излучения поверхности трубы. $C_0 = 5,7$ $\text{ Вт } / \text{ м }^2$, коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon = 0,3$ - степень черноты поверхности трубы. Определив Φ_n , легко найти α_n по формуле (18).

Зная общий коэффициент теплоотдачи α и коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, по разности находят коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_k = \alpha - \alpha_n, \text{ Вт } / (\text{ м }^2 \cdot \text{ К })$$

Содержание отчета:

1. Схема установки с описанием.
2. Таблица записей показаний приборов.
3. Краткое описание работы.
4. Подробные расчеты.

Лабораторная работа №4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ШАРА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

Цель работы: углубить знания по теории теплоотдачи путем экспериментального определения коэффициента теплоотдачи шара α при охлаждении его поверхности направленным потоком воздуха.

Задание.

1. Экспериментально определить коэффициент теплоотдачи шара при вынужденной конвекции воздуха.
2. Рассчитать коэффициент теплоотдачи шара при вынужденной конвекции воздуха по известному критериальному уравнению.

3. Сопоставить экспериментальные и расчетные данные.
4. Вычислить погрешность измерений по известным паспортным данным приборов установки.
5. Сформулировать выводы, подготовить и защитить отчет.

Вопросы, подлежащие проработке до выполнения работы:

1. Метод регулярного режима.
2. Первая теорема Кондратьева.
3. Темп охлаждения, методика определения.
4. Определение "критерия подобия" и "определяющей температуры".
5. Что характеризуют Nu , Re , Pr ?
6. В чем состоит преимущество безразмерных критериальных зависимостей по сравнению с зависимостями, составленными из размерных параметров?

Методика определения коэффициента теплоотдачи.

В данной лабораторной работе для опытного определения коэффициента теплоотдачи α используется нестационарный режим охлаждения шара, предварительно нагретого до заданной температуры в электрической печи и помещенного в поток атмосферного воздуха с температурой $t_{жс}$.

Процесс охлаждения разных внутренних точек шара, как показывает анализ экспериментальных данных, имеет общие закономерности, суть которых заключается в следующем. Участок кривой, отражающий динамику понижения температуры t любой внутренней точки шара, близкий к начальному моменту времени охлаждения, в общем случае будет иметь неправильную форму из-за влияния на его формирование начального теплового состояния шара. Следующий участок кривой имеет форму близкую к экспоненциальной зависимости температуры от времени охлаждения и отражает влияние на процесс, в большей степени, теплофизических свойств материала, из которого изготовлен шар, и, в меньшей степени, начального температурного поля. Третий (последний) участок кривой характеризуется тем, что температура точек шара асимптотически во времени стремится к температуре воздуха. Другими словами, состояние шара на последнем участке его охлаждения стремится к состоянию теплового равновесия с окружающим воздухом. Если теперь построить график, по оси абсцисс которого будем отсчитывать время охлаждения выбранной внутренней точки шара τ , а по оси ординат (Рис.4.1) – логарифм её избыточной температуры $\theta = t - t_{жс}$, то начальный участок (режим) графика может меняться от случая к случаю, т.к. его форма обусловлена особенностями начального температурного поля шара.

Второй участок графика будет иметь форму прямой линии, начиная с τ_1 до τ_2 , и соответствует регулярному режиму охлаждения шара. Данная закономерность будет наблюдаться для всех точек шара с той лишь разницей, что прямые будут параллельны друг другу, но с одним и тем же наклоном к оси абсцисс τ .

Таким образом, весь процесс охлаждения шара (тела) может быть разделен на три стадии:

1. начальная стадия;
2. стадия регулярного режима;
3. стадия стационарного режима.

Рассмотрим, более подробно, вторую стадию процесса охлаждения. Как следует из рис.4.1, для участка регулярного режима охлаждения шара имеет место

линейная зависимость логарифма избыточной температуры тела (в любой его точке) от времени охлаждения,

$$\ln \theta = -m \cdot \tau + A, \quad (20)$$

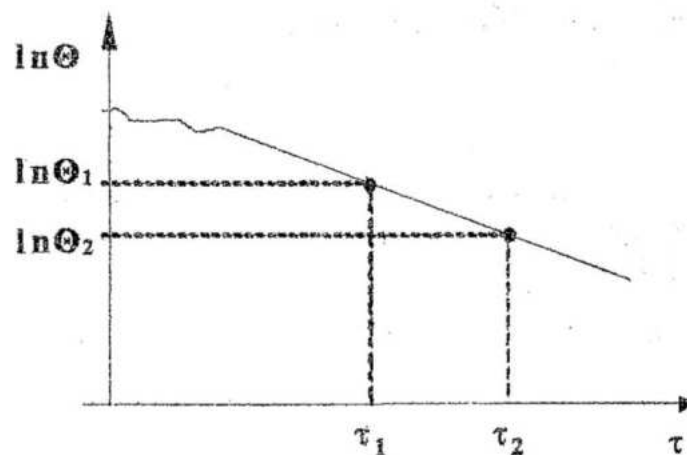


Рис.4.1. Изменение температуры во времени при охлаждении тела.

т.е. избыточная температура любой точки шара убывает во времени по экспоненциальному закону

$$\theta = \theta_0 e^{-m\tau}. \quad (21)$$

После дифференцирования обеих частей уравнения (20) по τ получим

$$\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -m = \text{const} \quad (22)$$

Левая часть уравнения (22) представляет собою относительную скорость изменения избыточной температуры любой точки шара, которая всегда по-

стоянна и равно m . При этом она не зависит ни от координат, ни от времени.

Величина m , $1/c$, характеризует интенсивность охлаждения тела и называется темпом охлаждения, который определяется как условиями охлаждения, так и теплофизическими свойствами материала шара.

Если применить уравнение (20) к двум произвольным моментам времени τ_1 и τ_2 , то получим

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (23)$$

Формула (23) даёт возможность определить величину темпа охлаждения из опыта; для этого необходимо измеренные в какой-нибудь точке тела температуры представить в полулогарифмических координатах $\ln \theta = f(\tau)$. На прямолинейном участке полученной зависимости выбрать две точки и соответствующие им величины $\ln \theta$ и τ подставить в формулу (23). Следует отметить, что соотношения (20 – 23) также являются справедливыми и для средней по объёму шара избыточной его температуре θ_v .

Основные закономерности регулярного теплового режима были подробно исследованы Г.М. Кондратьевым. Он определил основные связи, существующие между темпом охлаждения, физическими свойствами тела, его формой, размерами и условиями охлаждения.

Выражение для зависимости темпа охлаждения от всех перечисленных параметров, в том числе и от среднего по поверхности шара коэффициента теплоотдачи α , можно найти из анализа теплового баланса следующим образом.

Очевидно, что шар - это термодинамическая система с границей по его поверхности, которая обменивается теплом с окружающей средой (поток воздуха) в форме закона Ньютона – Рихмана при постоянном объёме шара. Тогда первый закон термодинамики запишется так

$$dQ = dU = c\rho V d\theta_v = c\rho V \left(\frac{\partial \theta_v}{\partial \tau} \right) d\tau, \quad (24)$$

где $dQ < 0$ - количество теплоты, отведенной от шара через границу системы в окружающую среду (воздух) за время $d\tau$, Дж; dU - изменение внутренней энергии шара, Дж; $c = c\rho = c_v$ - теплоемкость материала, из которого изготовлен шар; V - объём шара, m^3 ; ρ - плотность материала, kg/m^3 ; τ - время, с.

С другой стороны отведенная теплота dQ с поверхности шара в воздух за счёт теплоотдачи будет равна

$$dQ = -\bar{\alpha} \bar{\theta}_F \cdot F \cdot d\tau, \quad (25)$$

где $\bar{\alpha}$ – среднее значение коэффициента теплоотдачи; $\bar{\theta}_F$ – средний температурный напор между поверхностью тела и средой в данный момент времени:

$$\bar{\theta}_F = \int_F \theta_F dF, \quad (26)$$

Приравнявая выражения (24) и (25), находим

$$-\frac{\partial \theta_V}{\partial \tau} = \frac{\bar{\alpha} F}{c\rho V} \bar{\theta}_F \quad (27)$$

и, если разделить полученное выражение на θ_V и учесть, что $c\rho V = C$, Дж/К, полная теплоемкость тела

$$-\frac{1}{\theta_V} \cdot \frac{\partial \theta_V}{\partial \tau} = \frac{\bar{\theta}_F}{\theta_V} \cdot \frac{\bar{\alpha} \cdot F}{C} \quad (28)$$

В левой части этого выражения согласно уравнению (22) стоит относительная скорость охлаждения m , $1/c$, и, если отношение $\bar{\theta}_F / \theta_V$ обозначить через Ψ , то уравнение (28) можно записать в виде

$$m = \frac{\Psi \bar{\alpha} F}{C} = \frac{\Psi \bar{\alpha} F}{c\rho V} \quad (29)$$

Из последнего уравнения следует, что относительная скорость охлаждения или темп охлаждения m , однородного тела при конечном значении α пропорциональна коэффициенту теплоотдачи, поверхности тела и обратно пропорциональна его теплоёмкости (первая теорема Кондратьева).

В уравнении (29) множитель $\Psi = \bar{\theta}_F / \theta_V$ называется коэффициентом неравномерности распределения температуры в теле и зависит от условий охлаждения на поверхности тела.

Учитывая, что в данной лабораторной работе исследуется охлаждение шара, используя в уравнении (29) формулы объема шара и его площади поверхности: $V = \pi d^3/6$, $F = \pi d^2$, получаем:

$$\alpha = \frac{c\rho d}{6\Psi} m \quad (30)$$

Эта формула (30) является завершающей и позволяет при известных значениях теплоемкости c , плотности ρ , диаметра шара d , а также коэффициента Ψ , вычислить α через темп охлаждения m шара, определяемого из опыта.

При определении коэффициента теплоотдачи в данной лабораторной работе делается ряд упрощающих допущений:

- Влияние излучения с поверхности шара на процесс его охлаждения по сравнению с конвективным охлаждением шара мало.
- Ввиду малых чисел Bi ($Bi < 0.1$) распределение температуры в теле зависит от его размеров и физических свойств и, следовательно, усредненные температуры по поверхности и объёму шара будут одинаковыми $\bar{\theta}_F = \theta_V$. В этом случае коэффициент неравномерности $\Psi = 1$.

Опытная установка.

Экспериментальная установка представляет собой электрическую печь для нагрева образца и камеру охлаждения с нагнетателем воздуха, где осуществляется охлаждение нагретого тела (рис.4.2).

Для регулировки мощности нагревателя электрическая печь снабжена лабораторным автотрансформатором (ЛАТР), амперметром и вольтметром.

Исследуемым телом служит шар, выполненный из стали. В центр сферы вмонтирован спай хромель-алюмелевой термопары. Для фиксирования температуры шара вторичным прибором является милливольтметр.

Проведение опыта.

Включить электрическую печь, задать мощность нагревателя печи (по указанию преподавателя) при помощи ЛАТРа, амперметра и вольтметра.

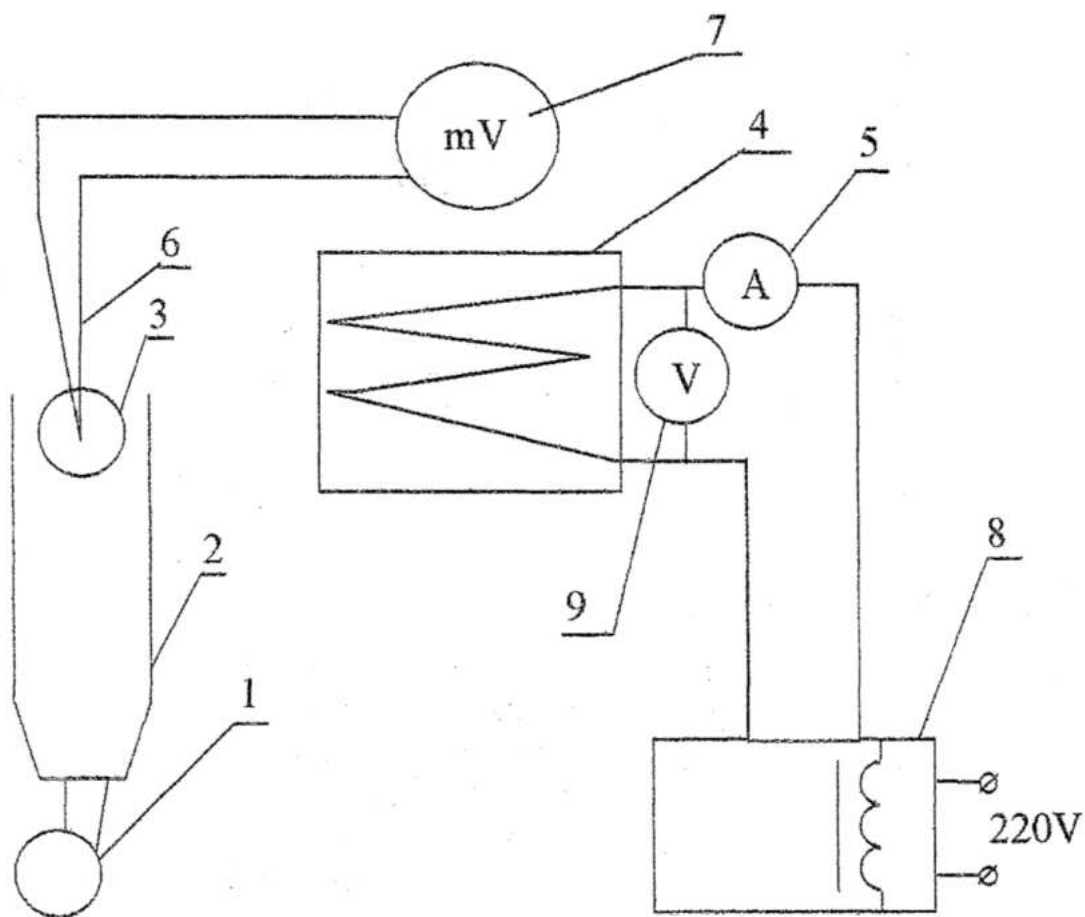


Рис.4.2. Схема экспериментальной установки:
 1 – нагнетатель воздуха; 2 – камера охлаждения; 3 – стальной шар; 4 – электрическая печь; 5 – амперметр; 6 – термопара; 7 – милливольтметр; 8 – ЛАТР; 9 – вольтметр.

Таблица 4.1

Параметры воздуха

Параметры воздуха			
Расход воздуха $V, \text{ м}^3/\text{с}$	Теплопроводность $\lambda \cdot 102, \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	Кинематич. коэф-т вязкости $\nu, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr

Характеристики шара и данные измерений

Характеристики шара			Данные измерений					
Диаметр $d, \text{м}$	Теплоёмкость $c, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Время $\tau, \text{с}$	Температура шара $t_{ст}, \text{°C}$	Температура воздуха $t_{ж}, \text{°C}$	Избыточная температура $\theta, \text{°C}$	$\ln \theta$	Диаметр камеры охлаждения $D, \text{м}$

Шар поместить в печь и начать запись показаний милливольтметра до тех пор, пока температура шара не установится постоянной во времени, что будет означать равномерное прогревание всего шара. Быстро нагретый шар из печи поместить в камеру охлаждения. Пустить секундомер и через каждые 30 секунд по милливольтметру фиксировать температуру охлаждаемого образца. Показания записывать в таблицу 4.2. Измерение температуры шара продолжать до тех пор, пока она не станет равной температуре окружающей среды.

Температуру воздуха, поступающего в камеру, измерить ртутным термометром, а расход его – по ротаметру.

Обработка опытных данных.

1. Определить избыточную температуру образца $\theta = t - t_{ж}$ и вычислить $\ln \theta$.
2. Построить график $\ln \theta = f(\tau)$, т.е. по оси ординат отложить $\ln \theta$, а по оси абсцисс τ – время.
3. На прямолинейном участке построенной зависимости $\ln \theta - \tau$ выбирают две удаленные друг от друга точки и находят темп охлаждения m по формуле (23)
4. На основании найденной величины темпа охлаждения $m, \text{с}^{-1}$, по уравнению (30) рассчитать значение коэффициента теплоотдачи шара $\alpha_{эксп}, \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
5. Рассчитать число Нуссельта при помощи критериального уравнения, полученного для вынужденного обтекания шара средой. Это уравнение получено Б.Д. Кацнельсон и Ф.А. Тимофеевой:

$$Nu = 2 + 0,33Pr^{0,33} Re + 0,35Pr^{0,36} Re^{0,56} \quad (31)$$

для числа Re от 0 до 150000 и для числа Pr от 0,6 до 0,8.

Коэффициент кинематической вязкости для числа Рейнольдса $Re = wd/\nu$ и число Прандтля Pr выбирают из таблицы физических свойств сухого воздуха по определяющей температуре – температуре набегающего потока воздуха. За определяющий размер принимают диаметр шара d , за определяющую скорость w – скорость в самом узком месте поперечного сечения канала камеры охлаждения, когда в ней находится шар.

$$W_{y.c.} = \frac{V}{S_{y.c.}}; \quad S_{y.c.} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4},$$

где значения диаметра шара d , диаметр камеры охлаждения D и удельная теплоемкость c материала, из которого выполнен шар, приведены на стенде экспериментальной установки.

6. После вычисления критерия Нуссельта по формуле (31) определить коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{расч.} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d},$$

λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $Вт/(м \cdot К)$ выбирают из таблицы физических свойств сухого воздуха по определяющей температуре.

7. Сравнить $\alpha_{эксп.}$ и $\alpha_{расч.}$ и сделать вывод.

Содержание отчета:

1. Схема установки с описанием.
2. Таблица записей показаний приборов.
3. Краткое описание работы.
4. Подробные расчеты.

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ И КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ МЕЖДУ ДВУМЯ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

Цель работы – углубление знаний по вопросам излучения твердых тел.
Вопросы, подлежащие изучению до проведения работы:

1. Процесс излучения твердых тел.
2. Излучение между твердыми телами.
3. Приведенный коэффициент излучения.
4. Законы излучения.

Описание опытной установки.

Установка состоит из двух стальных цилиндров, расположенных один в другом.

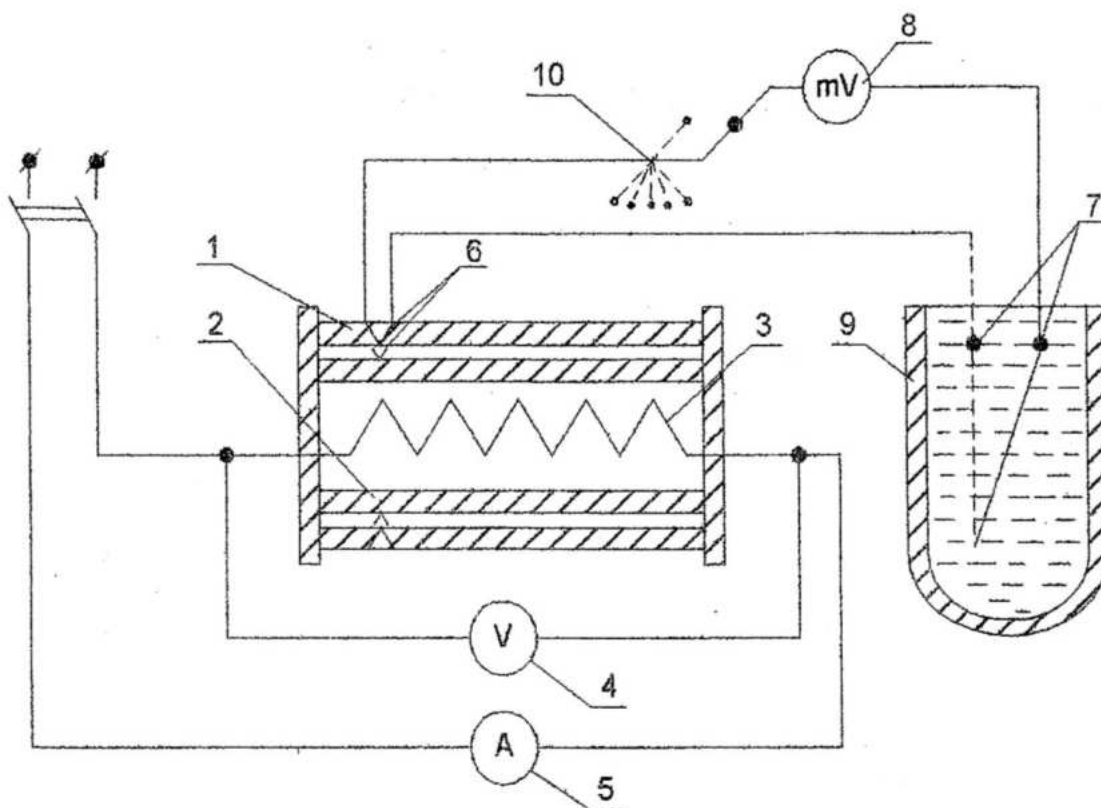


Рис. 5.1. Схема установки для определения коэффициента излучения твердого тела:

1 - наружная труба; 2 - внутренняя труба; 3 - электронагреватель; 4 - амперметр; 5 - вольтметр; 6 - горячий спай термопар; 7 - холодный спай термопар; 8 - милливольтметр; 9 - коробка холодных спаев термопар; 10 - переключатель.

Во внутреннем цилиндре установлен электрический нагреватель, в цепь которого включены амперметр и вольтметр. В среднем сечении установки на поверхностях внутреннего и наружного цилиндров установлены восемь термопар, каждая из которых с помощью переключателя соединяется с гальванометром. Первые четыре точки показывают температуру внутренней стенки наружного цилиндра, следующие четыре - температуру наружной стенки внутреннего цилиндра.

Порядок проведения опыта.

Включают электрический нагреватель, установка подогревается. Через каждые 5 минут производят записи (в таблицу 5.1) показаний приборов (гальванометра, амперметра, вольтметра). Записи делают до установившегося теплового равновесия.

Таблица 5.1

Показания приборов

№ опыта	Показания термомпар								I, А	U, В	Ф, Вт
	Внутренняя поверхность наружного цилиндра				Наружная поверхность внутреннего цилиндра						
	1	2	3	4	5	6	7	8			
1											
2											
3											
4											
5											

Обработка результатов опыта

Подсчитывают средние значения замеренных величин при установившемся тепловом равновесии. Определяют общую мощность как произведение силы тока на напряжение:

$$\Phi = I U, \text{ Вт}$$

Общая мощность складывается из мощности излучения $\Phi_{из}$, мощности конвекции Φ_k и мощности на потери $\Phi_{пот}$, т.е.:

$$\Phi = \Phi_{из} + \Phi_k + \Phi_{пот}. \quad (32)$$

Мощность излучением можно определить по формуле:

$$\Phi_{из} = \varepsilon_{пр} c_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] F_{cp},$$

где $\varepsilon_{пр}$ - приведенная степень черноты; $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_1 и T_2 - средние температуры наружного и внутреннего цилиндров при установившемся режиме, К; $\varepsilon_{пр} c_0 = c_{пр}$ - приведенный коэффициент излучения,

$$F_{cp} = \frac{F_1 + F_2}{2}.$$

средняя поверхность цилиндров, где $F_1 = \pi d_1 l$, $F_2 = \pi d_2 l$. Здесь $d_1 = 0,082$ м - внутренний диаметр наружного цилиндра, $d_2 = 0,059$ м - наружный диаметр внутреннего цилиндра, $l = 0,415$ м - длина цилиндров.

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{F_2}{F_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)}.$$

формула для приведенной степени черноты, когда одно тело расположено внутри другого.

Можно принять $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,3$, т.к. цилиндры изготовлены из одного материала. Мощность конвекции равна мощности теплопроводности через воздушную прослойку между цилиндрами, т.к. воздух там неподвижен.

Определив ε_{np} , находим C_{np} . Затем определяем Φ_k по формуле:

$$\Phi_k = \Phi_{мен} = \frac{\lambda_{эк}}{d} (T_2 - T_1) F_{cp}.$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эк} = \varepsilon_k \lambda_{воз}$.
Здесь ε_k - коэффициент конвекции, который определяют по формуле:

$$\varepsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25}.$$

$\lambda_{воз} - \frac{Вт}{м \cdot К}$ - коэффициент теплопроводности воздушной прослойки при ее средней температуре;

$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2}$ - средняя температура, по которой выбирают из таблицы физических свойств воздуха его кинематический коэффициент вязкости ν и коэффициент температуропроводности a для нахождения критерия Грасгофа и критерия Прандтля:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot d^3 \Delta T}{\nu^2}, \quad Pr = \frac{\nu}{a},$$

где

$$\beta = \frac{1}{T_{cp}}, K^{-1}; \quad g = 9,81 \text{ м/с}^2,$$

толщина воздушной прослойки между цилиндрами:

$$d = \frac{d_1 - d_2}{2}, \text{ м};$$

температурный напор $\Delta T = T_{cp} - T_{жс}$, здесь $T_{жс}$ - температура окружающего воздуха, К.

Определив все составляющие в формуле (32), находим $\Phi_{пот}$ по разности:

$$\Phi_{пот} = \Phi - (\Phi_{из} + \Phi_k).$$

Отчет должен содержать:

1. Схему установки с описанием.
2. Описание опыта.
3. Таблицу записей показаний приборов.
4. Расчеты и вывод.

Лабораторная работа № 6

ИСПЫТАНИЕ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА

(Продолжительность работы 8 ч. Из них 2ч – знакомство с котельной и ее оборудованием, точками замеров при испытании; 2ч – испытание котла; 2ч – анализы отобранных проб; 2ч – обработка данных и составление теплового баланса котла.)

Цель работы – изучение оборудования котельной, ее работы, определение качественных, количественных и экономических характеристик котла, составление теплового баланса котла.

Вопросы, подлежащие проработке

1. Схема отопительной котельной.
2. Конструкции котлов средней мощности.
3. Конструкции деаэратора и экономайзера.
4. Вспомогательное оборудование котельной (топливоподача, золоудаление, циклоны, насосы, вентиляторы, дымососы).
5. Контрольно-измерительные приборы котельной.
6. Правила отбора средней пробы.
7. Принцип работы газоанализаторов.
8. Анализы топлива, шлака, золы и уноса; их цель.
9. Качественные, количественные и экономические характеристики котлов.
10. Характеристики топки.
11. Полезная теплота и потери теплоты.
12. Тепловой баланс котла.

Задания

1. Произвести замеры в указанной преподавателем точке.
2. Обработать результаты испытания.
3. Составить тепловой баланс котла.
4. Написать и защитить отчет.

Паспортные данные котла № 1

Паровой котел ДКВР 4/13 переведен на водогрейный. Общая поверхность нагрева котла $H=183,3 \text{ м}^2$. Площадь колосниковой решетки $R=3,84 \text{ м}^2$. Объем топки $V=9,139 \text{ м}^3$. Производительность циркуляционного насоса $D_{\text{цн}} = 250000 \text{ кг/ч}$.

При испытании котла необходимо выяснить, на какое количество котлов работает насос во время испытания, и учесть это при определении количества воды, проходящей через испытуемый котел.

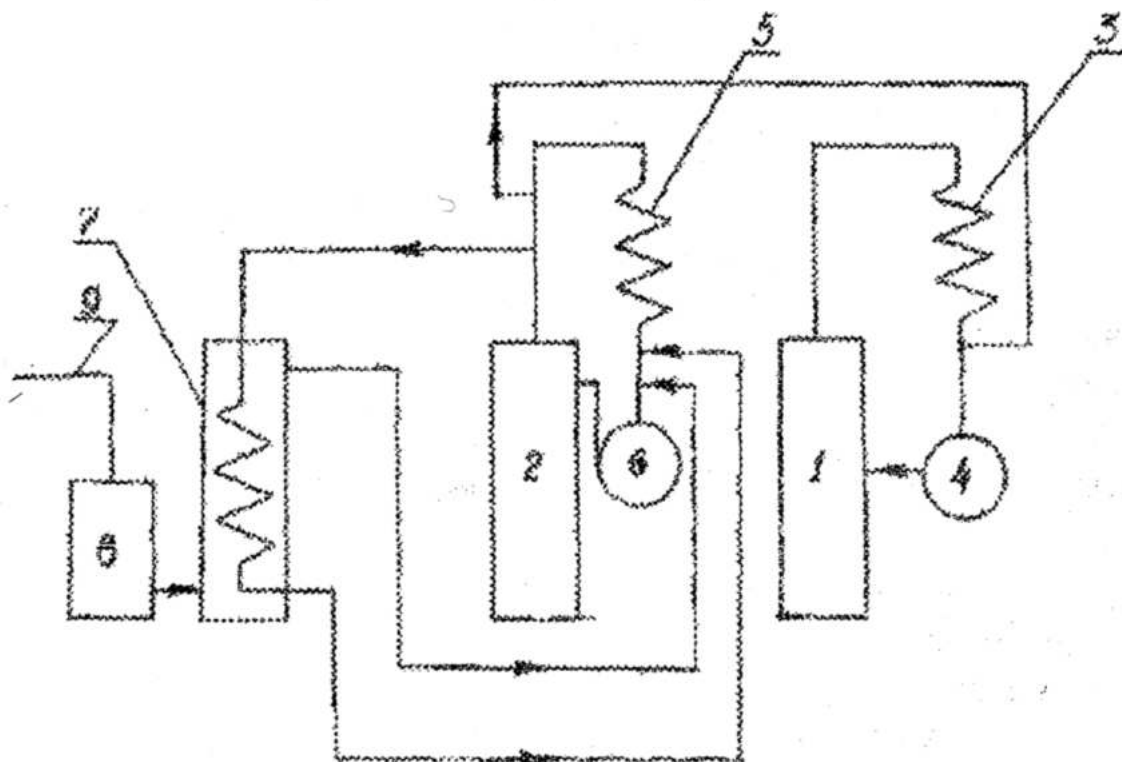


Рис.2. Схема котлоагрегата.

1-котел №1 (испытуемый); 2 – котел горячего водоснабжения; 3 – система отопления; 4 – циркуляционный насос; 5 – водоразбор горячего водоснабжения; 6- насос горячего водоснабжения; 7- деаэратор; 8 – экономайзер; 9 – водопроводная вода

Порядок проведения опытов

Точки замеров, наименование замеров и перечень необходимых приборов приведены в таблице 6.1

Наименование замеров и перечень необходимых приборов

Точка замера	Наименование замера	Контрольно-измерительные приборы
1. На котле	Давление в котле	Манометр
2. Топка	Расход топлива	ПМЗ или весы
3. Топка	Отбор пробы топлива	Сосуд с герметической крышкой
4. Топка	Отбор пробы шлака	- « -
5. Топка	Отбор пробы золы	- « -
6. Циклон	Отбор пробы уноса	- « -
7. Обратная водяная магистраль	Количество воды, поступающей в котел	Насос
8. - « -	Температура воды	Термометр
9. Горячая водяная магистраль на отопление	Температура воды	- « -
10. Основание дымовой трубы	Температура уходящих газов	- « -
11. Дымоход перед экономайзером	Температура газов	- « -
12. Основание дымовой трубы	- « -	- « -
13. Дымоход	Анализ продуктов горения	Газоанализатор
14. Водопровод перед экономайзером	Температура воды	Термометр
15. Водопровод после экономайзера	- « -	- « -
16. На улице	Температура окружающего воздуха	- « -

Обязанности студентов у точек замеров

1-й – фиксирует давление воды в котле каждые 10 мин.

2-й - находится возле кочегара и ведет наблюдения за расходом топлива, замеряя время остановки питателя. При нормальной работе питателя его производительность 1600 кг/ч (замерено в присутствии зав. котельной в 2001 г. во время испытания котла).

Если питатель не работает, расход топлива замеряется взвешиванием. Отбирает среднюю пробу топлива.

3-й – находится у топки котла, следит за своевременной чисткой топки от шлака и заливкой его водой. Немедленно после извлечения из топки отбирает среднюю пробу шлака.

4-й - находится у топки. Обязан проследить, чтобы перед испытанием зольник был очищен от золы. После испытания отбирает среднюю пробу золы.

5-й – находится у циклона. Перед испытанием высыпает унос из циклона. После испытания отбирает его среднюю пробу.

6-й – фиксирует время остановки циркуляционного насоса.

7-й – замеряет каждые 10 мин температуру воды, поступающей в систему отопления.

8-й – замеряет каждые 10 мин температуру воды после отопления.

9-й – замеряет каждые 10 мин температуру уходящих из котла газов.

10-й – замеряет каждые 10 мин температуру газов после экономайзера.

11-й – замеряет каждые 10 мин разрежение у дымовой трубы (тягу).

12- и 13-й – осуществляют анализ продуктов горения каждые 10 мин.

14-й – замеряет каждые 10 мин температуру воды перед экономайзером.

15-й – замеряет каждые 15 мин температуру воды после экономайзера.

16-й – замеряет температуру наружного воздуха каждые 10 мин.

После испытания котла подсчитывают средние значения замеренных величин и сводят их в таблицу 6.2.

Таблица 6.2

Замеренные параметры и их величины

Наименование замера, его обозначение и размерность	Полученная величина
1. Часовой расход топлива В, кг/ч	
2. Часовое количество нагреваемой воды в котле (производительность котла), Дц.в., кг/ч	
3. Температура горячей воды на отопление, т'г.в., °С	
4. Температура обратной воды после отопления, т'х.в., °С	
5. Температура воды перед экономайзером, т'в.э., °С	
6. Температура воды после экономайзера т"в.э., °С	
7. Температура дымовых газов перед экономайзером т'г.э., °С	
8. Температура дымовых газов после экономайзера т"г.э., °С	
9. Давление воды в котле на отопление Р, Па	
10. Давление воды в котле на горячее водоснабжение, кПа	
11. Температура окружающего воздуха t _{о.в.} , °С	
12. Состав продуктов горения RO ₂ , O ₂ , %	
13. Температура воды на горячее водоснабжение, °С	
14. Давление воды в водопроводе, кПа	
15. Давление «прямой» воды на отопление, кПа	
16. Давление обратной воды после отопления, кПа	
17. Давление «прямой» воды на горячее водоснабжение, кПа	
18. Давление обратной воды после горячего водоснабжения, кПа	

После заполнения сводной таблицы проводят анализы отобранных проб.

Анализ топлива

Определение влажности.

Пробу топлива измельчают, делят на 16 квадратов, из каждого квадрата отбирают небольшое количество топлива, смешивают и помещают в предварительно взвешенный сосуд, называемый бюксой. После взвешивания бюксы с топливом помещают в сушильный шкаф и выдерживают там в течение 2 часов при температуре 105-110 °С. Влажность определяется отношением потери массы при сушке к массе топлива до сушки.

Показатели для расчета:

- 1) масса бюксы с крышкой;
- 2) масса бюксы с крышкой и топливом;
- 3) масса топлива в бюксе M_m ;
- 4) масса бюксы с крышкой и топливом после сушки;
- 5) потеря массы M_{nom} ;
- 6) влажность топлива

$$W^P = \frac{M_{nom}}{M_m} \cdot 100\%$$

Определение зольности.

Обработку пробы топлива проводят методом квадратов – так же, как и при определении влажности. Вместо бюксы используют фарфоровую лодочку, которую вместе с навеской после взвешивания помещают в раскаленную докрасна муфельную печь. Выдерживают лодочку в печи в течение 2-х часов. Топливо сгорает, лодочку с золой помещают в эксикатор, затем взвешивают. Зольность топлива определяется отношением массы золы к массе топлива.

Показатели для расчета:

- 1) масса лодочки;
- 2) масса топлива в лодочке M'_m ;
- 3) масса лодочки с золой после прокалки;
- 4) масса золы в лодочке M_z ;
- 5) масса лодочки с топливом;
- 6) зольность топлива

$$A^P = \frac{M_z}{M'_m} \cdot 100\%$$

Определение коксумости и выхода летучих веществ

Проба топлива обрабатывается методом квадратов. Тарой является специальный тигель с плотной крышкой, в него помещается проба топлива. После взвешивания тигель с топливом под крышкой помещают в раскаленную муфельную печь. Топливо в тигле не сгорает, т.к. плотно закрыто крышкой, а коксуется. При этом выделяются летучие горючие газы, которые приоткрывают крышку и выходят в печь, где сгорают. Когда все летучие вещества выйдут из топлива, пламя потухнет. Оставшийся в тигле кокс прокаливают в течение 3 минут, охлаждают под крышкой в эксикаторе и взвешивают.

Коксумость топлива определяется отношением массы кокса к массе топлива. Выход летучих газов определяется отношением потери в весе при прокалке (за вычетом влаги) к массе топлива.

Показатели для расчета:

- 1) масса тигля с крышкой;
- 2) масса тигля с крышкой и топливом;
- 3) масса топлива в тигле M_t'' ;
- 4) масса тигля с крышкой и топливом после прокалки;
- 5) масса кокса M_k ;
- 6) коксумость

$$K = \frac{M_k}{M_t''} \cdot 100\%$$

- 7) потеря массы при коксумости (летучие и влага);

$$M_{пот} = 100 - K \quad ,\%$$

- 8) выход летучих веществ

$$V_{лет} = M_{пот} - W^P \quad ,\%$$

Анализ шлака

Анализ шлака осуществляется в целях определения недожога топлива. Взвешенный и высушенный шлак прокаливают в муфельной печи. Выгоревшее из него топливо представляет потерю в весе. Недожог в шлаке определяется отношением потери в весе к массе сухого шлака.

Показатели для расчета:

- 1) масса тигля;
- 2) масса тигля со шлаком;
- 3) масса шлака;
- 4) масса тигля со шлаком после сушки;
- 5) потеря в весе при сушке;
- 6) масса сухого шлака $M_{сух. шл.}$;
- 7) масса тигля со шлаком после прокалки;

- 8) потеря массы при прокалке $M_{пр}$;
 9) недожог в шлаке

$$C^P_{шл} = \frac{M_{пр}}{M_{сух.шл.}} \cdot 100\%.$$

Анализ золы и уноса проводится аналогично анализу шлака.

Обработка результатов испытания

1. Теплота сгорания топлива подсчитывается по формуле Менделеева:

$$Q_H^P = [81 C^P + 300 H^P + 26(S^P - O^P) - \frac{6}{9} H^P + W^P] \cdot 4,2 \text{ кДж/кг.}$$

Состав топлива, кроме золы и влаги, обычно примерно одинаков для данного месторождения. Для углей Восточной Сибири можно принять следующий состав топлива: $H^P = 3\%$; $S^P = 1\%$; $N^P = 1\%$; $O^P = 6\%$. Содержание влаги и золы определяют при испытании котла, а углерода по разности:

$$C^P = 100 - (H^P + S^P + N^P + O^P + W^P + A^P), \%$$

2. Тепловое напряжение зеркала горения:

$$\frac{Q}{R_p}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}},$$

где $Q = V \cdot Q_H^P$ – часовое количество тепла, кДж/ч;
 R – площадь колосниковой решетки, м^2 .

3. Тепловое напряжение топочного объема:

$$\frac{Q}{V}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}},$$

где V – объем топки, м^3 .

4. Весовое напряжение колосниковой решетки:

$$\frac{B}{R}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}},$$

где B – часовой расход топлива, кг/ч.

5. Удельный теплосъем с поверхности нагрева котла определяется по формуле:

$$\frac{D_{ц.в.} \cdot c_v (t_{г.в.} - t_{х.в.})}{H_k}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}},$$

где $D_{ц.в.}$ – количество воды, циркулирующей в котле, кг/ч; определяется по формуле:

$$D_{ц.в.} = \frac{D_{ц.н.} \cdot \tau_{ц.н.}}{n \cdot \tau_{исп}}, \text{ кг/ч,}$$

где $D_{ц.в.}$ – производительность циркуляционного насоса, кг/ч;

$\tau_{ц.н.}$ – время работы циркуляционного насоса, ч;

$\tau_{исп}$ – время испытания котла, ч;

n – количество котлов, питающихся от данного циркуляционного насоса во время испытания;

c_v – теплоемкость воды при средней ее температуре, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$t_{г.в.}, t_{х.в.}$ – температура горячей и холодной воды, поступающей и выходящей из системы отопления, °С;

F_k – поверхность нагрева котла, м^2

6. Коэффициент избытка воздуха определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5CO}{N_2}},$$

где O_2 – среднее содержание кислорода в продуктах горения, определенное во время испытания;

CO – угарный газ, определяется по характеристикам неполноты горения Z :

$$Z = (21 - \beta \cdot RO_2) - (RO_2 + O_2).$$

Здесь RO_2 и O_2 – среднее содержание RO_2 и O_2 в продуктах горения, определенное при испытании котла; β – характеристика топлива, определяется по формуле:

$$\beta = 2,38 \frac{H^P - \frac{O^P}{8}}{C^P + 0,368 \cdot S^P} + 0,005,$$

где H^P, C^P, O^P, S^P – составляющие топлива, %.

Зная Z и β , можно определить CO :

$$CO = \frac{Z}{0,6 + \beta};$$

в продуктах горения N_2 определяется по разности

$$N_2 = 100 - (RO_2 + CO + O_2), \%$$

7. Полезная теплота определяется по формуле:

$$Q_1 = \frac{D_{ц.в.}}{B} (t_{г.в.} - t_{х.в.}) c_v, \text{ кДж/кг;}$$

к.п.д. котла

$$\eta_k = q_1 = \frac{Q_1}{Q^P} \cdot 100\%;$$

теплопроизводительность котла равна $Q_1 \cdot B$, кДж/ч.

8. Потери теплоты с уходящими дымовыми газами:

$$Q_2 = \left(\frac{1,86 \cdot C^P}{RO_2} \cdot 0,32 + 0,48 \cdot \frac{9 \cdot H^P + W^P}{100} \right) \cdot (t_{d.g.} - t_{o.s.}) \cdot 4,2 \text{ кДж/кг,}$$

где C^P H^P W^P – составляющие топлива, %;

$t_{d.g.}$ и $t_{o.s.}$ – температура дымовых газов и окружающего воздуха (средние за время испытания), °С;

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q^P} \cdot 100 \%$$

9. Потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива:

$$Q_3 = \frac{56,6 \cdot C^P \cdot CO}{RO_2 + CO} \cdot 4,2 \text{ кДж/кг,}$$

где C^P – углерод топлива, %;

RO_2 и CO – составляющие продуктов полного (RO_2) и неполного (CO) сгорания топлива, %.

10. Потеря теплоты от механической неполноты сгорания топлива:

$$Q_4 = Q_{шл} + Q_{зол} + Q_{ун},$$

где $Q_{шл}$, $Q_{зол}$, $Q_{ун}$ – потери тепла со шлаком, золой и уносом, вызванные попаданием топлива в шлак, золу и дымовые газы.

$$Q_{шл} = \frac{Q_{н.шл}^P \cdot M_{шл}}{B} \text{ кДж/кг,}$$

где

$$Q_{н.шл}^P = 81 C_{шл}^P \cdot 4,2 \text{ кДж/кг;}$$

$C_{шл}^P$ – недожог топлива в шлаке, определенный при анализе шлака, %;
 B – часовой расход топлива, кг/ч; $M_{шл}$ – масса шлака, кг/ч.

По аналогичным формулам определяют $Q_{зол}$ и $Q_{ун}$.

Если при испытании котла не представилось возможным произвести взвешивание шлака, золы, уноса, то количество их приблизительно можно определить следующим способом:

$$G_{шл} + G_{зол} + G_{ун} = \left(\frac{A^P + C_{шл}^P + C_{зол}^P + C_{ун}^P}{100} \right) \cdot B = G_{общ} \text{ кг/ч}$$

Под $G_{общ}$ нужно понимать то количество твердых веществ, которое осталось после сгорания топлива за час. Из этого количества обычно 70% относится к шлаку, 2% - к уносу, остальные 28% - к золе. Тогда

$$M_{шл} = 0,7 \cdot G_{общ}; \quad G_{зол} = 0,28 \cdot G_{общ}; \quad G_{ун} = 0,02 \cdot G_{общ}.$$

К остаточным потерям можно отнести потери тепла через обмуровку котла, через неплотности, при открывании топочных дверей и др. Их определяют по разности теплового баланса:

$$q_5 = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4) , \%$$

Результаты испытания котла сводят в таблицу 6.3

Таблица 6.3

Результаты испытания котла

Наименование	Показатели
1. Теплопроизводительность котла, кДж/ч	
2. Полезно использованная теплота (к.п.д.), %.	
3. Часовой расход топлива, кг/ч	
4. Часовое количество шлака, кг/ч	
5. Часовое количество золы, кг/ч	
6. Часовое количество уноса, кг/ч	
7. Теплотворность топлива, кДж/кг	
8. Характеристика неполноты сгорания	
9. Тепловое напряжение зеркала горения, кДж/(м ² ·ч)	
10. Тепловое напряжение топочного объема, кДж/(м ³ ·ч)	
11. Весовое напряжение колосниковой решетки, кг/(м ² ·ч)	
12. Удельный теплосъем, кДж/(м ² ·ч)	
13. Коэффициент избытка воздуха	
14. Потери теплоты а) с уходящими газами (физические потери), %; б) от неполноты сгорания (химические потери), %; в) механические потери, %; г) прочие потери, %.	

Содержание отчета

1. Схема установки со спецификацией.
2. Перечень точек замера, наименование замеров и перечень контрольно-измерительных приборов (табл. 6.1).
3. Таблица результатов замеров (табл. 6.2).
4. Результаты анализов проб, отобранных при испытании.
5. Обработка результатов испытания (расчеты).
6. Сводная таблица результатов расчетов (табл. 6.3).

ИСПЫТАНИЕ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ТГ – 150

Продолжительность работы – 4 ч.

Цель работы – изучение работы теплогенератора, определение его теплового баланса и технико-экономических показателей.

Вопросы, подлежащие проработке

1. Конструкции теплогенераторов.
 2. Оборудование установки.
 3. Газовый анализ.
 4. Тепловой баланс и коэффициент полезного действия.
- Исходные данные из технической характеристики теплогенератора

1. Производительность вентилятора теплогенератора – $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$.
2. Расход топлива – $9 - 18,5 \text{ кг/ч}$.
3. Теплопроизводительность – $85\,000 - 160\,000 \text{ ккал/ч}$ или $93 - 186 \text{ кВт}$.
4. Разность температур воздуха на выходе и на входе – $70 - 75 \text{ }^\circ\text{C}$.
5. Мощность электродвигателя – $5,5 \text{ кВт}$.
6. Масса – 750 кг .

Параметры работы теплогенератора, подлежащие измерению при проведении испытаний

1. Температура воздуха на входе в теплогенератор $t_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$.
2. Температура воздуха на выходе из теплогенератора $t_{\text{вых}}, \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Температура дымовых газов $t_{\text{д.г.}}, \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Время расхода $0,2 \text{ л}$ топлива $\tau, \text{ с}$.
5. Плотность топлива $\rho, \text{ кг/л}$.
6. Анализ дымовых газов на содержание в них кислорода O_2 и суммы $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = \text{RO}_2, \text{ \%}$.

Задания

1. Произвести замеры показателей в указанной преподавателем точке.
2. Обработать результаты испытаний.
3. Составить тепловой баланс теплогенератора.
4. Написать и защитить отчет.

Описание опытной установки

Лабораторная установка выполнена на основе серийного теплогенератора ТГ – 150.

Теплогенератор оборудован термометрами для измерения температуры воздуха на входе в теплогенератор и на выходе из него, а также температуры дымовых газов.

Таблица 7.1

№ опыта	Время измерений	Температура на входе $t_{вх}, ^\circ\text{C}$	Температура на выходе $t_{вых}, ^\circ\text{C}$	Температура дымовых газов $t_{уг}, ^\circ\text{C}$	Время расхода 0,2л топлива $\tau, \text{с}$	Плотность топлива $\rho, \text{кг/л}$	Состав дымовых газов	
							$\text{RO}_2, \%$	$\text{O}_2, \%$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
Среднее значение								

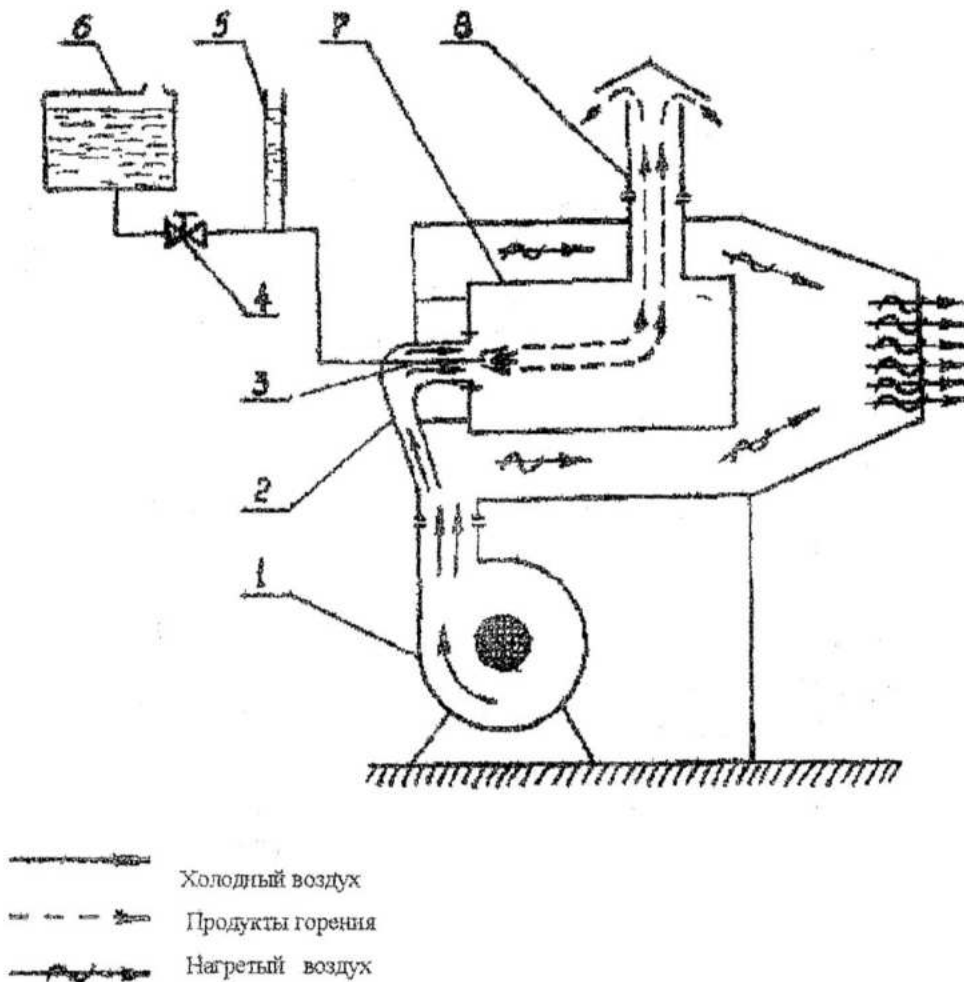


Рис.4. Схема установки

1 - Вентилятор центробежный; 2 - воздухопровод; 3 - форсунка; 4 - вентиль топливопровода; 5 - измерительная стеклянная трубка; 6 - бак топливный; 7 - камера сгорания; 8 - труба дымовая.

Для отбора проб дымовых газов для анализа в дымовой трубе теплогенератора установлена заборная трубка. Для измерения расхода топлива объемным способом топливопровод оборудован стеклянной измерительной трубкой, сообщаемой с топливным баком через запорный вентиль. При закрытии вентиля теплогенератор питается топливом из измерительной трубки, на которой имеются риски. Объем топлива между рисками равен 0,2 л.

Для измерения плотности топлива в стеклянную измерительную трубку помещен нефтенсиметр (ареометр).

Порядок проведения работы

Открыв вентиль топливопровода и включив рубильник электропитания, запускают теплогенератор. После установления стационарного режима, т.е. через 5 –10 мин работы теплогенератора, проводят измерения температуры воздуха на входе и выходе из теплогенератора, а также температуры газов (при помощи установленных ртутных термометров). Расход топлива измеряют объемным способом по времени расхода 0,2 л топлива, которое определяют с помощью секундомера. Для этого, закрыв вентиль топливопровода, наблюдают за падением уровня топлива в стеклянной измерительной трубке. Включают секундомер, когда уровень топлива достигнет верхней метки на измерительной трубке, и выключают – когда уровень топлива достигнет нижней метки.

Плотность топлива определяют с помощью ареометра, помещенного в стеклянную измерительную трубку. Измерения проводят в течение 30 минут через каждые 5 мин работы теплогенератора. По результатам измерений определяют средние арифметические значения замеренных температур за 30 мин работы теплогенератора, по которым производят расчет его показателей.

Анализ дымовых газов производят с помощью газоанализатора 2-3 раза за период испытания по методике, применяемой для испытаний котельных установок.

Обработка результатов испытания

1. Объемный расход топлива определяют по формуле:

$$V_{\text{г}} = \frac{720}{\tau_{\text{с}}} \text{ л/ч,}$$

где $\tau_{\text{с}}$ - время расхода 0,2 л топлива в секундах.

2. Массовый расход топлива определяют из выражения:

$$G_{\text{ч}} = \rho \cdot V_{\text{ч}}, \text{ кг/ч,}$$

где ρ - плотность топлива, кг/л.

3. Тепловой баланс теплогенератора определяют в кДж/кг сгоревшего топлива и в процентах. Количество теплоты, полученное при сгорании одного килограмма топлива, называется его теплотворностью

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = Q_{\text{пол}} + \Sigma Q_{\text{пот}} \text{ кДж/кг топлива.}$$

Для дизельного топлива «3» $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 42705$ кДж/кг топлива, где $Q_{\text{пол}}$ - полезное количество теплоты, израсходованное на нагревание воздуха, кДж/кг топлива.

$$Q_{\text{пол}} = \frac{5000 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_{\text{p}} (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})}{G_{\text{ч}}}, \text{ кДж/ч,}$$

где 5000 - производительность вентилятора теплогенератора, м³/ч;

$\rho_{\text{в}}$ - плотность воздуха при температуре его на выходе из теплогенератора, кг/м³;

$$\rho_{\text{в}} = \rho_0 \frac{273}{273 + t_{\text{вых}}}, \text{ кг/м}^3,$$

ρ_0 - плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³, можно принять $\rho_0 = 1,29$ кг/м³;

$t_{\text{вых}}$ - температура воздуха на выходе из теплогенератора, °С;

$G_{\text{ч}}$ - расход топлива, кг/ч;

c_{p} - массовая изобарная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · К):

$$c_{\text{p}} = c_{\text{p}}^0 \frac{273 + t_{\text{вых}}}{273}, \text{ кДж/(кг · К),}$$

здесь c_{p}^0 - массовая изобарная теплоемкость воздуха при нормальных условиях, кДж/(кг · К); можно принять

$$c_{\text{p}}^0 = 1 \text{ кДж/(кг · К);}$$

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{Г}} + Q_{\text{H}} + Q_{\text{ост}},$$

где $Q_{\text{Г}}$ - теплота, унесенная с продуктами горения, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг топлива}}$:

$$Q_{\text{Г}} = \frac{(G_{\text{ч}} + L_{\text{д}}) \cdot c_{\text{p}}^{\text{н}} \cdot (t_{\text{д.г.}} - t_{\text{вх}})}{G_{\text{ч}}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг топлива}},$$

где L_{∂} - действительное количество воздуха, затраченное на сгорание топлива, кг/ч;

C_p^n - массовая изобарная теплоемкость продуктов горения,

кДж/(кг · К), можно принять $C_p^n = 1,2$ кДж/(кг · К);

$t_{\partial,2}$ и $t_{вх}$ - температура дымовых газов и температура воздуха на входе в теплогенератор (в помещении), °С;

$$L_{\partial} = \alpha \cdot L_m \cdot G_u \cdot \rho_{воз}, \text{ кг/ч,}$$

где L_m - теоретическое количество воздуха, потребное для сгорания 1 кг топлива, $\frac{\text{м}^3 \text{ воздуха}}{\text{кг топлива}}$; можно принять $L_m = 11 \frac{\text{м}^3 \text{ воздуха}}{\text{кг топлива}}$;

$\rho_{воз}$ - плотность воздуха при температуре $t_{вх}$, кг/м³;

$$\rho_{воз} = \rho_0 \frac{273}{273 + t_{вх}}, \text{ кг/м}^3;$$

α - коэффициент избытка воздуха, определяемый по газовому анализу продуктов горения:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5 \cdot CO}{N_2}},$$

где O_2 - среднее содержание кислорода в продуктах горения, %; CO - содержание окиси углерода в продуктах горения, определяется из выражения:

$$CO = \frac{Z}{0,6 + \beta}, \text{ \%},$$

где β - характеристика топлива, определяемая по его составу

$$\beta = 2,38 \frac{H^P - \frac{O^P}{8}}{C^P + 0,368 \cdot S^P} + 0,005,$$

где H^P , O^P , C^P - содержание соответственно водорода, кислорода и углерода в топливе, %.

Для зимнего дизельного топлива «3» по ГОСТу 305-73 можно принять:

$$H^P = 16\%; O^P = 1\%; C^P = 82,5\%; S^P = 0,5\%.$$

Z - характеристика неполноты горения топлива:

$$Z = (21 - \beta \cdot RO_2) - (RO_2 + O_2);$$

N_2 – содержание азота в продуктах горения определяется по разности:

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO), \%$$

где RO_2 – определенное газовым анализом среднее содержание двуокислов (CO_2 и SO_2) в продуктах горения (дымовых газах);

Q_H – потери теплоты от неполноты горения топлива:

$$Q_H = \frac{56,6 \cdot C^P \cdot CO}{RO_2 + CO} \cdot 4,2, \frac{\text{кДж}}{\text{кг топлива}},$$

где C^P – содержание углерода в топливе, %;

RO_2 и CO – содержание двуокислов и окиси углерода в продуктах горения, %;

$$Q_{ост} = Q_H^P - (Q_{пол} + Q_{г} + Q_H), \frac{\text{кДж}}{\text{кг топлива}}.$$

После расчета теплового баланса в процентах нужно определить к.п.д. теплогенератора:

$$q_{пол} + q_{г} + q_H + q_{ост} = 100 \%;$$

$$q_{пол} = \frac{Q_{пол}}{Q_H^P} \cdot 100 \% = \eta \% -$$

-коэффициент полезного действия теплогенератора;

$$q_{г} = \frac{Q_{г}}{Q_H^P} \cdot 100 \%;$$

$$q_H = \frac{Q_H}{Q_H^P} \cdot 100 \%;$$

$$q_{ост} = \frac{Q_{ост}}{Q_H^P} \cdot 100 \%.$$

Содержание отчета

1. Схема установки со спецификацией.
2. Наименование замеров и перечень контрольно-измерительных приборов.
3. Таблица результатов замеров.
4. Обработка результатов замеров (расчеты).
5. Сводная таблица результатов расчета.

"ИСПЫТАНИЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ"

(2ч)

Цель работы - ознакомление со схемой холодильной установки, ее конструкцией, а также определение производительности ее и экономичности.

Вопросы, подлежащие проработке:

1. Принцип работы холодильных установок.
2. Конструкции существующих холодильных установок.
3. Диаграммы PV , TS и hS для холодильных установок.
4. Понятия холодопроизводительности и коэффициента использования тепла.

Задания:

1. Определить коэффициент использования тепла.
2. Вычертить схему работы установки.
3. Вычертить диаграммы PV , TS и hS .
4. Составить отчет о выполненной работе.

Краткое описание установки и проведения опыта:

Установка состоит из электродвигателя с компрессором (в одном кожухе), охладителя, дросселя, реле, терморегулятора и испарителя (холодильной камеры).

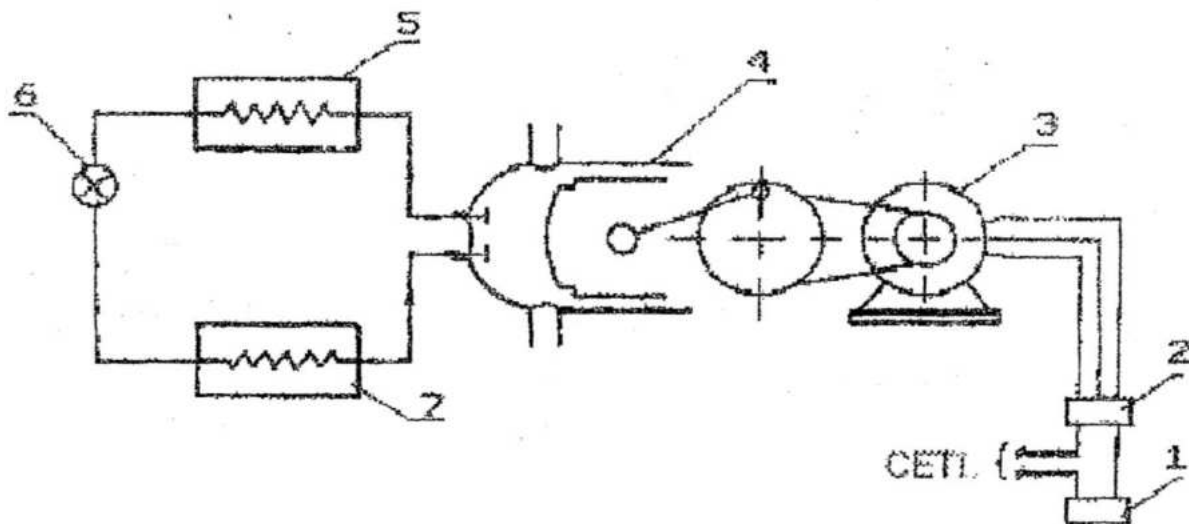


Рис.5.1 Схема холодильной установки:

- 1 – терморегулятор; 2 – реле; 3 – электродвигатель; 4 - компрессор; 5 – охладитель; 6 – дроссель; 7 – испаритель

В холодильную камеру вставлен сосуд массой M' , кг, в который налито M , кг воды. Температуру сосуда и воды замеряют термопарами каждые 10 минут после включения в сеть холодильной установки. Также записывают показания амперметра и вольтметра.

Записи производят до установления постоянной температуры воды (льда). Постоянная температура сосуда установится раньше, т.к. его теплоемкость меньше, чем воды.

Таблица 8.1

Таблица показателей замеров

Время, мин.	J, А	U, В	Температура воды, °С	Температура сосуда, °С
1				
2				
3				
4				
5				

Обработка результатов опыта

1. Определение времени опыта в часах (от начала замеров до установившегося режима) τ - для воды, τ' - для сосуда.
2. Определение мощности, затраченной на работу компрессора:

$$q = 3,6J \cdot U \text{ кДж/ч},$$

- где J - средняя за опыт сила тока, А; U - среднее за опыт напряжение, В.
2. Определение холодопроизводительности:

$$q_1 = \frac{(t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}})M \cdot C_p}{\tau} + \frac{(t'_{\text{кон}} - t'_{\text{нач}})M' \cdot C'_p}{\tau'} \text{ кДж/ч},$$

где $t_{\text{кон}}$ и $t_{\text{нач}}$ - температура воды конечная и начальная °С, M - масса воды, кг, $C_p=4,2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ - теплоемкость воды; τ - время охлаждения воды от начальной до конечной ее температуры, ч; $t'_{\text{кон}}$ и $t'_{\text{нач}}$ - конечная и начальная температура сосуда, °С; M' - вес сосуда, кг, $C'_p=0,46 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ - теплоемкость сосуда (стального); τ' - время охлаждения сосуда от $t'_{\text{нач}}$ до $t'_{\text{кон}}$, ч.

4. Определение коэффициента использования тепла:

$$\varepsilon = \frac{q_1}{q}$$

Отчет

должен включать

1. Схему установки .
2. Описание проведения опыта.
3. Таблицу наблюдений.
4. Расчет.
5. Диаграммы PV , TS hS

Приложения

Таблица П.1

Плотность ρ , коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость C_p и коэффициент температуропроводности α различных материалов

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$C_p, \text{кДж/(кг}^\circ\text{C)}$	$\alpha 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
Альфонь	50	20	0,0465	--	--
Асбест листовой	30	770	0,1163	0,818	0,198
Асбест волокно	50	470	0,1105	0,818	0,290
Асфальт	20	2110	0,698	2,09	0,159
Бетон	20	2300	1,280	1,13	0,494
Войлок шерстяной	30	330	0,0524	--	--
Гипс	--	1650	0,291	0,88	--
Глина огнеупорная	450	1845	1,04	1,09	0,516
Гравий	20	1840	0,361	--	--
Дерево бальза	30	128	0,0524	--	--
Дерево дуб \perp волокнам	20	800	0,207	1,76	0,147
Дерево дуб \parallel волокнам	20	800	0,363	--	--
Дерево сосна \perp волокнам	20	448	0,107	2,7	--
Дерево сосна \parallel волокнам	20	448	0,256	--	--
Земля сухая	--	1500	0,1385	-	--
Земля влажная	--	1700	0,658	2,01	0,192
Зонолит	100	200	0,099	--	--
Каменный уголь	200	1400	0,186	1,31	1,03
Картон гофрированный	--	--	0,064	--	--
Кварц кристаллический \perp оси	0	2500-2800	7,21	0,836	3,34
Кварц кристаллический \parallel оси	0	2500-2800	13,6	--	--
Кирпич изоляционный	100	500	0,1395	--	--
Кирпич строительный	20	800-1500	0,23-0,3	0,8	--
Кирпич карборундовый	--	1000	11,3	0,678	1,66
Клинкер	30	1400	0,163	1,42	0,114
Кожа (подошвенная)	30	1000	0,160	--	--
Кокс порошкообразный	100	449	0,191	1,22	0,035
Копоть ламповая	40	190	0,0314	--	--
Лед	0	920	2,25	2,26	1,08
Лед	-95	--	3,96	1,17	--
Линолеум	20	1180	0,186	--	--
Магнезия 85% в порошке	100	216	0,0675	--	--
Мел	50	2000	0,93	0,88	0,531
Минеральная шерсть	50	200	0,0465	0,92	0,253
Мрамор	90	2700	1,31	0,419	1,15
Накись котельная	65	--	0,13-3,14	--	--
Опилки древесные	20	200	0,070	--	--
Парафин	20	920	0,268	--	--
Песок сухой	20	1500	0,326	0,798	2,73
Песок влажный	20	1650	1,130	2,09	0,492

Портландцемент	30	1900	0,303	1,13	0,140
Пробковая пластина	30	190	0,0420	1,88	0,117
Пробка гранулированная	20	45	0,0384	--	--
Резина	0	1200	0,163	1,38	0,0985
Сахарный песок	0	1600	0,582	1,26	0,278
Слюда	--	290	0,582	0,88	2,280
Сланец	100	2800	1,49	--	--
Снег	--	560	0,465	2,09	0,398
Совелит	100	450	0,0976	--	--
Стекло	200	2500	0,745	0,67	0,445
Стекланная вата	0	200	0,0372	0,67	0,278
Торфоплиты	50	220	0,064	--	--
Фарфор	95	2400	1,035	1,09	0,398
Фарфор	1055	2400	1,97	--	--
Фибра (пластина)	20	240	0,049	--	--
Шлакобетон в куске	--	2150	0,43	0,88	0,495
Шлаковая вата	100	250	0,47	--	--
Штукатурка	20	1680	0,78	--	--
Целлулоид	30	1400	0,210	-	--
Целотекс	20	215	0,0465	--	--
<i>Металлы</i>					
Алюминий	0	2670	204,0	0,92	91,3
Бронза	20	8000	64,0	0,381	20,8
Латунь	0	8600	85,5	0,378	26,4
Медь	0	8800	384	0,381	114,5
Никель	20	9000	58,2	0,462	14,01
Олово	0	7230	64,0	0,921	39,2
Ртуть	0	13600	4,9	0,138	4,25
Свинец	0	11400	34,9	0,129	23,6
Серебро	0	10500	458	0,234	186,5
Сталь	20	7900	45,4	0,462	12,5
Цинк	20	7000	116,3	0,394	42,3
Чугун	20	7220	63,0	0,504	17,4

Таблица П.2

Физические свойства сухого воздуха
($P_B = 760$ мм рт. ст. $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$\alpha, \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	P_r
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,4	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701

50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,5666	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
80	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Таблица П.3

Степень черноты полного нормального излучения для различных материалов

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	ε
Алюминий полированный	225-575	0,039-0,057
Алюминий шероховатый	26	0,055
Алюминий, окисленный при 600 $^\circ\text{C}$	200-600	0,11-0,19
Железо полированное	425-1020	0,144-0,377
Железо, свежеработанное наждаком	20	0,242
Железо окисленное	100	0,736
Железо окисленное гладкое	125-525	0,78-0,82
Железо литое необработанное	925-1115	0,87-0,95
Стальное литье полированное	770-1040	0,52-0,56
Сталь листовая шлифованная	940-1100	0,55-0,61
Сталь, окисленная при 600 $^\circ\text{C}$	200-600	0,80
Сталь листовая с потным блестящим слоем окиси	25	0,82
Чугун обточенный	830-990	0,60-0,70
Чугун, окисленный при 600 $^\circ\text{C}$	200-600	0,64-0,78
Окись железа	500-1200	0,85-0,95
Золото, тщательно полированное	225-635	0,018-0,035
Латунная пластина, прокатанная, с естественной поверхностью	22	0,06
Латунная пластина, прокатанная, обработанная грубым наждаком	22	0,20

Латунь, окисленная при 600 ⁰ С	200-600	0,61-0,59
Медь, тщательно полированная, электролитная	80-115	0,018-0,023
Медь торговая, шабренная до блеска, но не зеркальная	22	0,072
Медь, окисленная при 600 ⁰ С	200-600	0,57-0,87
Окись меди	800-1100	0,66-0,54
Расплавленная медь	1075-1275	0,16-0,13
Молибденовая нить	725-2600	0,096-0,292
Никель технически чистый, полированный	225-375	0,07-0,087
Никелированное травленое железо неполированное	20	0,11
Никелевая проволока	185-1000	0,096-0,186
Никель, окисленный при 600 ⁰ С	200-600	0,37-0,48
Окись никеля	650-1255	0,59-0,86
Хромоникель	125-1034	0,64-0,76
Олово, блестящее, луженое, листовое железо	25	0,043-0,064
Платина чистая, полированная пластина	225-625	0,054-0,104
Платиновая лента	925-1115	0,12-0,17
Платиновая нить	25-1230	0,036-0,192
Платиновая проволока	225-1375	0,073-0,182
Ртуть очень чистая	0-100	0,09-0,12
Свинец серый, окисленный	25	0,281
Свинец, окисленный при 200 ⁰ С	200	0,63
Серебро полированное, чистое	225-625	0,0198-0,0324
Хром	100-1000	0,08-0,26
Цинк (91,1%) полированный	225-325	0,045-0,053
Цинк, окисленный при 400 ⁰ С	400	0,11
Оцинкованное листовое железо блестящее	28	0,228
Оцинкованное листовое железо серое, окисленное	24	0,276
Асбестовый картон	24	0,96
Асбестовая бумага	40-370	0,93-0,945
Бумага тонкая, наклеенная на металлическую пластину	19	0,924
Вода	0-100	0,950,963
Гипс	20	0,903
Дуб строганный	20	0,895
Кварц плавный, шероховатый	20	0,932
Кирпич красный, шероховатый, но без больших неровностей	20	0,93
Кирпич диносовый, неглазурованный, шероховатый	100	0,80
Кирпич диносовый, глазурованный, шероховатый	1100	0,85
Кирпич шамотный глазурованный	1100	0,75
Кирпич огнеупорный	--	0,8-0,9
Лак белый эмалевый, на железной шероховатой поверхности	23	0,906
Лак черный блестящий, распыленный на железной пластине	--	0,875
Лак черный матовый	--	0,96-0,98
Лак белый	--	0,80-0,95
Шеллак черный блестящий, на луженом железе	21	0,821

Масляные краски различных цветов	100	0,92-0,96
Алюминиевые краски различной давности и с переменным содержанием Al	100	0,27-0,67
Алюминиевый лак по шероховатой пластине	20	0,39
Алюминиевая краска после нагрева до 325 ⁰ C	150-315	0,35
Мрамор сероватый, полированный	22	0,931
Резина твердая, лощеная пластина	23	0,945
Резина мягкая, серая, шероховатая (рафинированная)	24	0,859
Стекло гладкое	22	0,937
Сажа, свечная копоть	95-270	0,952
Сажа с жидким стеклом	100-185	0,959-0,947
Сажа ламповая 0,075мм и больше	40-370	0,945
Толь	21	0,910
Уголь очищенный (0,9% золы)	125-625	0,81-0,79
Угольная пыль	1040-1405	0,526
Фарфор глазурованный	22	0,924
Штукатурка шероховатая, известковая	10-88	0,91
Эмаль белая, проплавленная к железу	19	0,897

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амерханов Р.А. Теплотехника: учеб. для вузов по направлению «Агроинженерия» / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 432 с.
2. Апальков А.Ф. Теплотехника: учеб. пособие для вузов / А.Ф. Апальков. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 187 с.
3. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве: учеб. по инж. спец. сел. хоз-ва / Б.Х. Драганов, А.В. Кузнецов, С.П. Рудобашта; под ред. Б.Х. Драганова. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463 с.
4. Ерофеев В.Л. Теплотехника: учеб. для вузов / В.Л. Ерофеев, П.Д. Семенов, А. С. Пряхин. – М.: Академкнига, 2006. – 488 с.
5. Кириллин В.А. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
6. Круглов Г.А. Теплотехника: учеб. пособие для вузов: рек. УМО / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. – СПб.: Лань, 2010. – 207 с.
7. Круглов Г.А. Теплотехника: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Агроинженерия»: рек. УМО / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2012. – 207 с.
8. Ляшков В.И. Теоретические основы теплотехники: учеб. пособие для вузов / В.И. Ляшков. – М.: Высш. шк., 2008. – 318 с.
9. Нечаев В.В. Теплогенерирующие установки: учеб. пособие для высш. аграр. учеб. заведений по направлениям «Агроинженерия» и «Теплоэнергетика»: допущено М-вом сел. хоз-ва РФ / В.В. Нечаев, В.А. Бочкарев; Иркут. гос. с.-х. акад. – Иркутск: ИрГСХА, 2010. – 102 с.
10. Нечаев В.В. Теплопроводность: учеб. пособие для вузов / В.В. Нечаев, А.А. Тупицын; Иркут. гос. с.-х. акад. – Иркутск: ИрГСХА, 2004. – 103 с.
11. Рудобашта С.П. Теплотехника: учеб.: доп. М-вом сел. хоз-ва РФ для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. «Агроинженерия» / С.П. Рудобашта. – М.: КолосС, 2010. – 599 с.
12. Таиров Э.А. Практикум по технической термодинамике: учеб. пособие / Э.А. Таиров, В.В. Нечаев. – Иркутск: ИрГСХА, 2007. – 108 с.
13. Таиров Э.А. Теоретические основы теплотехники. Термодинамика: учеб.-метод. указ. по курсу «Теоретические основы теплотехники»: для самостоят. работы студентов высш. учеб. заведений по направлению подгот. «Теплоэнергетика» и «Агроинженерия» / Э.А. Таиров; Иркут. гос. с.-х. акад. – Иркутск: ИрГСХА, 2007. – 45 с.
14. Теплотехника: учеб. для вузов / под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 711 с.
15. Теплотехника: учеб. для вузов / А.П. Баскаков [и др.]; под ред. А.П. Баскакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: БАСТЕТ, 2010. – 325 с.

Нечаев Валерий Владимирович
Очиров Вадим Дансарунович

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к лабораторным работам
по курсу «Теплотехника»

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать .14.2014. Формат 60×86/16. Печ. л. 1,0
Тираж 100 экз.

Издательство Иркутской государственной
сельскохозяйственной академии
664038, Иркутская обл., Иркутский район
пос. Молодежный