

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»
(ТУСУР)

Утверждаю:

Зав. Кафедрой РЭТЭМ д. т. н.
_____ В.И. Туев

«___» _____ 2015г

Теплофизика

Методические указания по лабораторным работам для студентов,
обучающихся по направлению подготовки бакалавра 280700.62
«Техносферная безопасность» (36 часов)

Разработчик:

к.т.н. Апкарьян А.С.

Содержание

Введение	3
1. Правила выполнения лабораторных работ	4
2. Инструкция по технике безопасности	5
3. Лабораторная работа №1. Определение удельных объёмов методом гидростатического взвешивания	6
4. Лабораторная работа №2. Определение потерь тепла в прямоточном рекуператоре	11
5. Лабораторная работа №3. Определение потерь тепла в противоточном рекуператоре	16
6. Лабораторная работа №4. Определение потерь тепла через стенку теплового агрегата	21
7. Лабораторная работа №5. Приборы и методы определения параметров рабочих тел	26
8. Лабораторная работа №6. Определение влажности твёрдого топлива	32
9. Лабораторная работа №7. Определение зольности твёрдого топлива	36
10.Лабораторная работа №8. Энтропийные диаграммы. Определение параметров воды и водяного пара	40
11. Список основной и дополнительной литературы	45

Введение

Изучение теплофизики студентами технических высших учебных заведений предусматривает проведение определённого количества лабораторных работ.

В данных методических указаниях даются общие разделы, ознакомление с которыми необходимо для правильного проведения самих работ: содержание работы, описание экспериментальной установки, методика и последовательность проведения работ, обработка результатов измерений.

Данное методическое указание не ограничивается только лишь проведением эксперимента, В каждой работе дана и расчётная часть, а в отдельных работах полученные экспериментальные данные дают возможность провести аналитическое описание изученных свойств и составить графики исследуемого теплофизического процесса.

Некоторые работы проводятся непосредственно на действующем предприятии, что вызывает особый интерес у студентов, когда теоретические знания реально применяются на практике.

1 Правила выполнения лабораторных работ в лаборатории теплофизики, теплотехники и гидравлики

1. Каждая лабораторная работа выполняется бригадой в составе 3-4 студентов.
2. Прежде чем приступить к лабораторной работе, каждый студент должен изучить ее описание, подготовить бланк отчета и сдать преподавателю коллоквиум по теоретическим вопросам, относящийся к данной работе.
3. Студент, не имеющий бланк отчета или не сдавший коллоквиум, к проведению лабораторной работы не допускается. Он обязан отработать ее в указанное преподавателем время.
4. После окончания лабораторных занятий результаты измерений и расчетов каждый студент предъявляет преподавателю для визирования.
5. К началу следующего лабораторного занятия студент должен сдать законченный отчет по выполненной работе, без данного отчета он не допускается к дальнейшим лабораторным работам.
6. Отчет по работе выполняется на листах белой бумаги (формат А4) в соответствии с ГОСТ 2.105-95. На титульном листе указывается наименование работы, кто выполнил, кто проверил, указывается год выполнения работы. На листах отчета должны быть: цель работы, схема опытного устройства, таблицы результатов измерений и таблицы результатов расчетов, с расчетами. Особое внимание при проведении расчетов необходимо обращать на соблюдение единства систем единиц измерения. Все величины, участвующие в расчетах, выражать в единицах СИ. Графики строятся на бумаге формата А4 и прилагаются к отчету.

2 Инструкция по технике безопасности при работе в лаборатории теплофизики, теплотехники и гидромеханики

1. К практическим занятиям в лаборатории допускаются студенты, получившие инструктаж по технике безопасности с соответствующим оформлением его в журнале.
2. Студентам запрещается без разрешения преподавателя включать электрооборудование, открывать и закрывать задвижки и вентили трубопроводов, включать измерительные приборы и установки.
3. Перед началом работы необходимо ознакомиться с заданием, с правилами безопасности проведения работ, проверить исправность ограждений и предохранительных устройств.
4. При работе в лабораториях выполняется только та лабораторная работа, которая предусмотрена планом. Категорически воспрещается выполнять другие лабораторные работы.
5. Во время выполнения лабораторной работы ходить без дела по лаборатории запрещается, т.к. этим отвлекается внимание других студентов и остается без наблюдения лабораторная установка, что может повлечь за собой несчастный случай.
6. Оборудование лаборатории относится к разряду опасных в связи с возможностью поражения электрическим током, поэтому студенты обязаны строго соблюдать правила безопасности. В случае прекращения подачи электроэнергии необходимо отключить установку и оставаться у рабочего места.
7. Если произошел несчастный случай, то необходимо немедленно оказать первую помощь и сообщить об этом преподавателю.
8. Бережное отношение к приборам и оборудованию лаборатории создает условия вашей безопасности.
9. Запрещается в лабораторию приносить верхнюю одежду.
10. По окончании работы приведите в порядок рабочее место.

3 Лабораторная работа №1

Определение удельных объёмов жидкостей методом гидростатического взвешивания

Количество аудиторных часов – 4 часа.

Количество часов на СРС - 2 часа.

Цель работы

- 1 Закрепление знаний по разделу "Термодинамика".
- 2 Освоение экспериментальной методики определения удельных объёмов жидкостей.

Необходимое оборудование и материалы

- 1 Аналитические (рычажные) весы.
- 2 Стеклоанный или кварцевый поплавок.
- 3 Стеклоанный сосуд ёмкостью 0,5 литра.
- 4 Ртутный термометр.
- 5 Водно - спиртовой раствор – 0,5 литра.
- 6 Водно - глицериновый раствор — 0,5 литра.

Экспериментальная установка

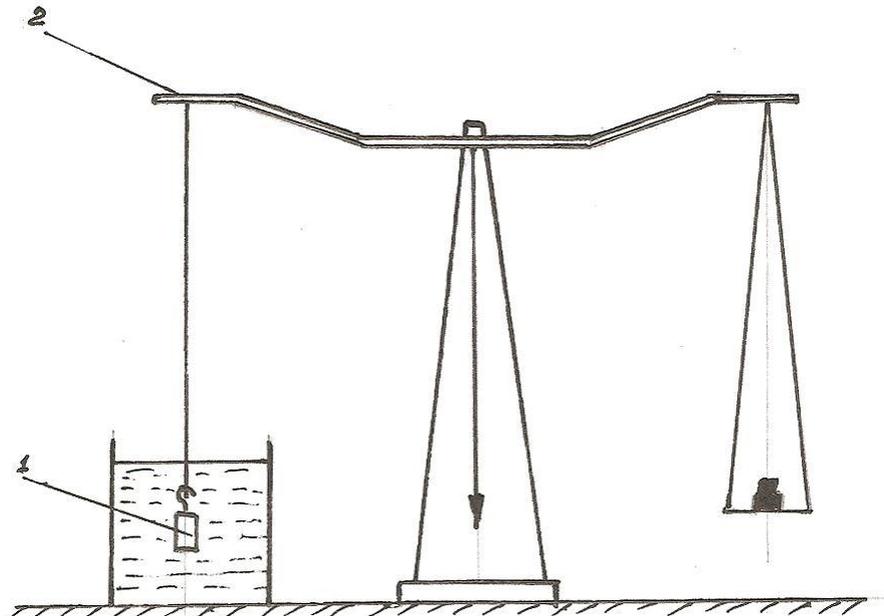


Рис.3.1. Экспериментальная установка для определения плотности жидкости.

Основным элементом экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 3.1 являются аналитические (рычажные) весы - 2. На

одну из сторон весов подвешивается поплавков -1. Поплавок стеклянный или кварцевый. Поплавок погружают в ёмкость с исследуемой жидкостью. Температуру жидкости определяют ртутным термометром.

Теоретические основы метода

Феноменологические свойства жидкости, как сплошной среды, могут существенно изменяться при изменении ее термодинамических параметров. Плотность жидкости ρ возрастает при повышении давления и, как правило, уменьшается при повышении температуры. Последнее свойство характеризуется коэффициентом теплового расширения β_T , определяющим относительное изменение объема W при изменении температуры T :

$$\beta_T = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dT} . \quad (3.1)$$

Среднее значение этого коэффициента при увеличении температуры на ΔT :

$$\beta_T = \frac{1}{W} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta T} , \quad (3.2)$$

где ΔW — приращение объема.

Вязкость жидкости с повышением давления несколько увеличивается, с повышением температуры — значительно уменьшается. В частности, для воды справедлива эмпирическая формула Ж. Пуазейля:

$$\nu = 0,179 \cdot 10^{-2} / (1000 + 34T + 0,22T^2) , \quad (3.3)$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/с;
 T - температура, °С.

Поверхностное натяжение жидкости определяется видом газа над ее свободной поверхностью, примесями и температурой. Коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе на единице длины периметра свободной поверхности жидкости.

Чтобы получить полное представление о характере изменения плотности жидкости от её температуры, необходимо перед началом эксперимента замерить её и поддерживать в течение всего эксперимента.

Этот способ основан на том, что на поплавок, погружённый в исследуемое вещество, действует выталкивающая сила, пропорциональная плотности исследуемого вещества. При известном объёме поплавок эту силу можно определить, сравнив результаты взвешивания поплавок в воздухе и в исследуемом веществе. Взвешивание поплавок производится на аналитических (рычажных) весах.

Задание:

- составить уравнение равновесия;

- определить плотность водно-спиртового раствора при температурах от 20 °С до 90°С методом гидростатического взвешивания;
- определить плотность водно-глицеринового раствора при температурах от 20°С до 90°С методом гидростатического взвешивания;
- построить график зависимости плотности жидкости от температуры.

Проведение опыта

Схема установки, выполненной по методу гидростатического взвешивания, показана на рис.1 применительно к определению плотности жидкости при атмосферном давлении. Чтобы измерить плотность исследуемой жидкости, производится троекратное взвешивание стеклянного или кварцевого поплавка 1 на аналитических весах 2.

При первом взвешивании определяется масса поплавка в воздухе. Условие равновесия весов с учётом выталкивающей силы, действующей на поплавок со стороны воздуха, записывается следующим образом:

$$V\rho_{пг} - V\rho_{вг} = m_1g, \quad (3.4)$$

где V – объём поплавка; $\rho_{п}$ – плотность материала поплавка; $\rho_{в}$ – плотность воздуха; m_1 – масса разновесок¹.

Далее производится взвешивание поплавка в дистиллированной воде (или в другой жидкости, плотность которой известна), для которого соответствует уравнение:

$$V\rho_{пг} - V\rho_{д.вг} = m_2g, \quad (3.5)$$

где $\rho_{д.в}$ – плотность дистиллированной воды; (значения плотности воды при различных температурах приведены в таблице 3.1).

Эти два взвешивания дают возможность определить объём поплавка. Решив совместно уравнение (3.4) и (3.5) получим:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_{д.в} - \rho_{в}}. \quad (3.6)$$

Наконец, взвешивание поплавка в исследуемой жидкости позволяет определить её плотность, так как в этом случае выполняется равенство

$$V\rho_{пг} - V\rho_{жг} = m_3g. \quad (3.7)$$

Решая уравнение 3.7 совместно с 3.4 получаем:

$$\rho_{ж} = \frac{m_1 - m_3}{V} + \rho_{в}. \quad (3.8)$$

¹ В этом и последующих уравнениях не учитывается выталкивающая сила воздуха, действующая на разновески, величина которой составляет 0,015 – 0,02% веса разновесок.

После того как будет рассчитана плотность жидкости ($\rho_{ж}$) при комнатной температуре (20 - 25 °С), провести аналогичную работу при температурах 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90°С.

По полученным результатам построить график зависимости плотности жидкости от температуры.

Таблица 3.1 - Таблица плотности дистиллированной воды при различных температурах

t, °С дист. воды	Плотность воды, 10 ³ кг/м ³	t, °С дист. воды	Плотность воды, 10 ³ кг/м ³	t, °С дист. воды	Плотность воды, 10 ³ кг/м
0	0,99987	17	0,99880	34	0,99394
1	0,99993	18	0,99862	35	0,99350
2	0,99997	19	0,99843	40	0,99118
3	0,99999	20	0,99823	50	0,98804
4	1,00000	21	0,99802	60	0,98318
5	0,99999	22	0,99780	70	0,97771
6	0,99997	23	0,99757	80	0,97269
7	0,99993	24	0,99732	90	0,965
8	0,99988	25	0,99707	100	0,95824
9	0,99981	26	0,99681	120	0,94373
10	0,99973	27	0,99652		
11	0,99963	28	0,99622		
12	0,99951	29	0,99592		
13	0,99943	30	0,99561		
14	0,99925	31	0,99521		
15	0,99915	32	0,99479		
16	0,99892	33	0,99436		

Обработка результатов измерений

Результаты всех расчетов вносить в таблицы наблюдений 3.2, 3.3 и 3.4.

Таблица 3.2

t воздуха, °С	Плотность поплавок, $\rho_{п}$ (кг/м ³)	Плотность воздуха, $\rho_{в}$ (кг/м ³)	Масса разновесок, m_1 (кг)

Таблица 3.3.

t, дистил. воды °С	Плотность поплавок, $\rho_{п}$, (кг/м ³)	Плотность дистил. воды, $\rho_{в}$, (кг/м ³)	Масса разновесок, m_2 , (кг)	Объём поплавок, V (м ³)

Таблица 3.4.

$t, ^\circ\text{C},$ жидкости	Плотность поплавка, $\rho_{\text{п}}, (\text{кг}/\text{м}^3)$	Объём поплавка, (м^3)	Масса разновесок, $m_1, (\text{кг})$	Масса разновесок, $m_2, (\text{кг})$	Плотность жидкости, $\rho_{\text{ж}}, \text{кг}/\text{м}^3$
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					

По результатам исследований построить график зависимости изменения плотности от значений температуры жидкости.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- 1 титульный лист.
- 2 наименование и цель работы.
- 3 схему опытной установки.
- 4 таблицу наблюдений.
- 5 обработку результатов опыта.
- 6 выводы по результатам работы

Контрольные вопросы

- 1 Какими величинами по молекулярной теории определяется агрегатное состояние вещества?
- 2 Что такое рабочее тело?
- 3 Параметры состояния рабочего тела.
- 4 Определение давления. Единицы измерения.
- 5 Определение температуры. Температурные шкалы. Единицы измерения.
- 6 Что такое плотность и её зависимость от других физических величин.
- 7 Какие величины характеризуют термодинамическое состояние системы?
- 8 Как определить вязкость?

Подписи исполнителей

Подпись преподавателя

4 Лабораторная работа № 2.

Определение потерь тепла в прямоточном рекуператоре

Количество аудиторных часов – 4 часа.

Количество часов на СРС - 2 часа.

Цель работы:

- 1 Закрепление знаний по разделу "Теплопередача", темы:
 - Теплообменные аппараты.
 - Рекуперативные и регенеративные теплообменные аппараты.
- 2 Освоение экспериментальной методики определения количества тепла переданного теплоносителем нагреваемой жидкости при прямотоке.
- 3 Освоение работы теплообменных аппаратов при прямотоке.

Необходимое оборудование и материалы

- | | | |
|---|-----------------------------------|-------|
| 1 | Прямоточный теплообменный аппарат | 1 шт. |
| 2 | Ртутный манометр | 4 шт. |

Экспериментальная установка

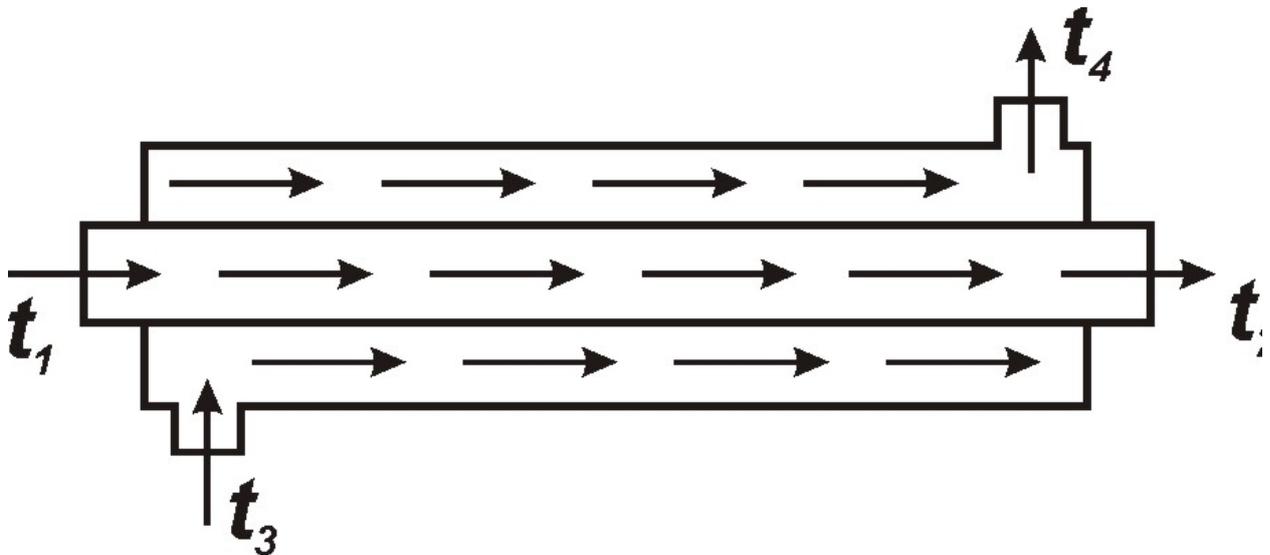


Рис. 4.1. Схема прямоточного теплообменного аппарата для определения потерь тепла

Экспериментальная установка представляет собой рекуператор системы «труба в трубе» (рис.4.1). Во внутреннюю трубку подаётся теплоноситель (жидкость или газ). Во внешнюю трубку подаётся холодная вода (нагреваемая жидкость или газ). Поток жидкости в обоих случаях имеет одинаковое направление - прямоток. Трубки установки выполнены из нержавеющей стали

Теоретические основы метода

Рассмотрим плоскую однослойную стенку толщиной δ и теплопроводностью λ из однородного материала. На наружных поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры $t_1 > t_2$; температура изменяется только в направлении оси x , перпендикулярно плоскости стенки, т.е. температурное поле одномерно, а градиент температуры равен dt/dx

Уравнение Фурье для этого слоя имеет вид

$$q = -\lambda dt/dx, \quad (4.1)$$

или

$$dt = -(q/\lambda)dx.$$

Проинтегрировав уравнение, получим

$$\int_1^2 dt = -(q/\lambda) \int_1^2 dx. \quad (4.2)$$

Если в уравнение ввести $x_2 - x_1 = \delta$ - толщина стенки, получим

$$q = \lambda/\delta (t_1 - t_2) = (\lambda/\delta)\Delta t, \quad (4.3)$$

или

$$q = (t_1 - t_2)/(\delta/\lambda). \quad (4.4)$$

Уравнение (4.4) является расчётной формулой теплопроводности плоской стенки. Оно связывает q , λ , δ , Δt .

Зная любые три величины, можно всегда найти четвёртую.

(δ/λ) – называется термическим сопротивлением стенки (R).

Определив по формуле (4.4) плотность теплового потока, можно определить общее количество тепла Q в джоулях, переданное через площадь поверхности плоской стенки за время τ .

$$Q = qA\tau = (\lambda/\delta)\Delta tA\tau, \quad (4.5)$$

где A - площадь поверхности.

Задание

- 1 Определить значения температуры теплоносителя на входе (t_1) и выходе (t_2) рекуператора.
- 2 Определить значения температуры нагреваемой жидкости на входе (t_3) и выходе (t_4) рекуператора.
- 3 Определить количество тепла переданного теплоносителем нагреваемой жидкости при прямотоке.

Проведение опыта

Чтобы получить полное представление о характере изменения температур жидкостей в рекуператоре, необходимо перед началом эксперимента подать теплоноситель во внутреннюю трубку, а нагреваемую жидкость во внешнюю и замерить температуры на входе и выходе. Температуру теплоносителя на входе (t_1) поддерживать постоянной в течение всего эксперимента. Так как длина установки (рекуператора) небольшая, то (t_2) в процессе работы практически равна (t_1)

Лабораторная работа основана на передаче тепла через стенку.

Теплопроводность стали трубки - λ , Вт/(м град).

Толщина стенки внутренней трубки – δ , м.

Температуру стен трубок внутри рекуператора принимаем равной температуре омывающей жидкости.

При проведении работы замерять температуру воды $(t_1), (t_2), (t_3), (t_4)$ рекуператора через 10 мин. Замеры производить до тех пор, пока (t_4) не станет постоянной. Результаты замеров температур заносить в таблицу.

Обработка результатов измерений

Количество тепла проходящего в продолжение 1 ч. при стационарном потоке через сечение $F \text{ м}^2$ составляет:

$$Q = \lambda F \frac{t_1 - t_4}{\delta} \quad [\text{Вт}], \quad (4.6)$$

где:

λ – коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м град);

t_1 и t_4 - температура на ограничивающих стенку поверхностях, °С;

δ – толщина стенки трубки, м;

F – площадь поверхности внутренней трубки рекуператора, м^2 .

Критерием для оценки эффективности установки является средний температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$, т.е. средняя разность температур греющей и нагреваемой жидкости.

Для выполнения работы необходимо:

- 1 Замерить толщину стенки внутренней трубки рекуператора (δ), м.
- 2 Замерить площадь поверхности внутренней трубки рекуператора (F), м^2 .
- 3 По таблице 4.1 определить коэффициент теплопроводности нержавеющей стали (λ) при температуре t_1 , Вт/(м град.С).
- 4 Через каждые 10 минут производить замеры температур $(t_1), (t_2), (t_3), (t_4)$, °С.
- 5 По полученным температурам и коэффициентам теплопроводности рассчитать количество тепла переданного нагреваемой жидкости – $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ в соответствии с температурой и коэффициентом теплопроводности, Вт.
- 6 Все полученные результаты вносить в таблицу 4.2.
- 7 Определить максимальное количество тепла, переданное нагреваемой жидкости в течение 1 часа, 2 часов.
- 8 Построить график зависимости изменения температуры (t_4) от времени (τ) при прямотоке.
- 9 Построить график зависимости изменения количества тепла переданное нагреваемой жидкости (Q) от времени (τ) при прямотоке.

Таблица 4.1. Коэффициенты теплопроводности легированных сталей
(при комнатной температуре)

Сталь	Состав стали, %					Вт/(м град.С)
	С	Si	Mn	Ni	Cr	
Нержавеющая	0,15 – 0,25	0,4	0,4	6,0 – 8,0	18 - 22	16,7
То же	0,32 – 0,4	2,3 – 2,9	0,5 – 0,7	23 - 27	18 - 20	13,0
Жаропрочная	0,25 – 0,3	1,8 – 2,2	0,5 – 0,7	14 - 15	19 - 20	13,0
То же	0,7 – 0,8	0,8 – 1,1	0,6 – 0,8	56 - 60	15 - 17	16,7
То же	0,25 – 0,3	0,3 – 0,5	0,3 – 0,5	-	28 - 32	18,8
Хромомолибдено- вая	0,36	0,2	0,62	0,23 Mo	1,16	33,4
Хромистая	0,1 – 0,2	0,5	-	-	4,6	36
Быстрорежущая	0,7	0,2	0,3	6,0	15 – 18W	31,4

Таблица 4.2. Результаты замеров

Номера замеров	Время замера τ , мин.	t_1 , °С	t_2 , °С	t_3 , °С	t_4 , °С	λ , Вт/(м град)	Q, Вт.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- титульный лист.
- наименование и цель работы.
- схему опытной установки.
- таблицу наблюдений.
- обработку результатов опыта.
- выводы по результатам работы

Контрольные вопросы

- 1 Что такое конвекция и конвективный теплообмен?
- 2 Как определить коэффициент теплоотдачи?
- 3 Что такое теплопередача? Способы передачи теплоты.
- 4 Что такое температурное поле, температурный градиент и тепловой поток?
- 5 Напишите закон Фурье. Уравнение теплопроводности однослойной и многослойной стенки.
- 6 Уравнение теплопроводности для цилиндрической стенки.
- 7 Что такое ламинарное и турбулентное движение? Что такое свободное и вынужденное движение?
- 8 Факторы, вызывающие теплообмен излучением.
- 9 Как определить поток излучения?
- 10 Закон Кирхгофа. Закон Стефана–Больцмана.
- 11 Как определить степень черноты?

Подписи исполнителей

Подпись преподавателя

5 Лабораторная работа № 3

Определение потерь тепла в противоточном рекуператоре

Количество аудиторных часов – 4 часа.

Количество часов на СРС - 2 часа.

Цель работы:

- 1 Закрепление знаний по разделу "Теплопередача", темы:
 - Теплообменные аппараты.
 - Рекуперативные и регенеративные теплообменные аппараты.
- 2 Освоение экспериментальной методики определения количества тепла переданного теплоносителем нагреваемой жидкости при противотоке.
- 3 Освоение работы теплообменных аппаратов при противотоке.

Необходимое оборудование и материалы

- | | |
|---------------------------------------|-------|
| 1 Противоточный теплообменный аппарат | 1 шт. |
| 2 Ртутный манометр | 4 шт. |

Экспериментальная установка

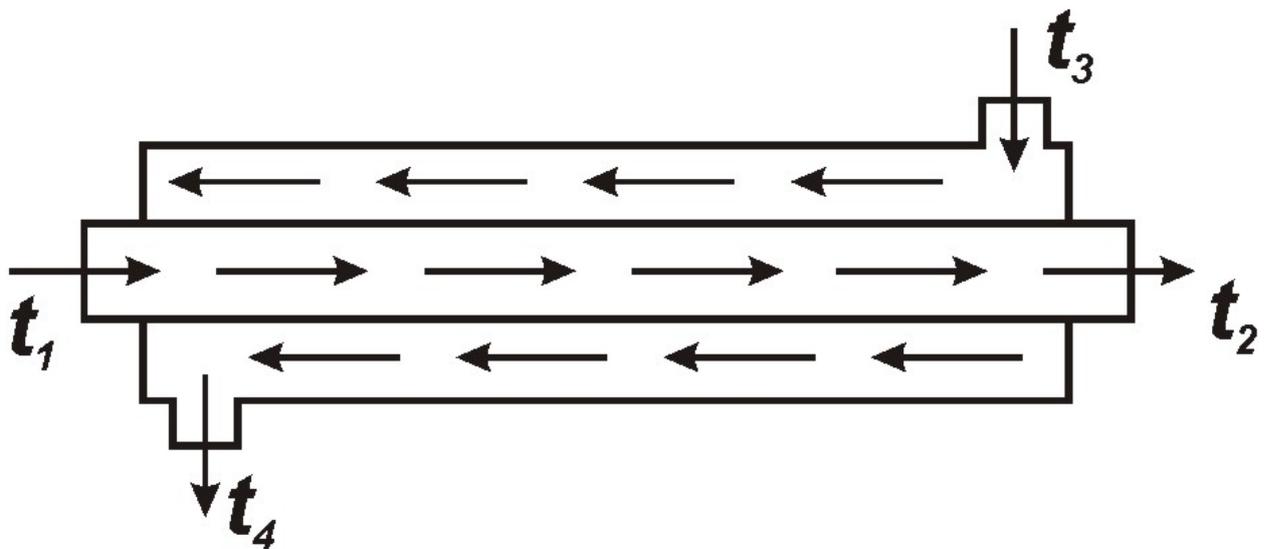


Рис. 5.1. Схема противоточного теплообменного аппарата для определения потерь тепла

Экспериментальная установка представляет собой рекуператор системы «труба в трубе» (рис.5.1). Во внутреннюю трубку подаётся теплоноситель (жидкость или газ). Во внешнюю трубку подаётся холодная вода (нагреваемая жидкость или газ). Потоки жидкости имеют противоположенное направление - противоток. Трубки установки выполнены из нержавеющей стали.

Теоретические основы метода

Рассмотрим плоскую однослойную стенку толщиной δ и теплопроводностью λ из однородного материала. На наружных поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры $t_1 > t_2$; температура изменяется

только в направлении оси x , перпендикулярно плоскости стенки, т.е. температурное поле одномерно, а градиент температуры равен dt/dx
Уравнение Фурье для этого слоя имеет вид

$$q = -\lambda dt/dx \quad (5.1)$$

или $dt = -(q/\lambda)dx$.

Проинтегрировав уравнение, получим

$$\int_1^2 dt = -(q/\lambda) \int_1^2 dx. \quad (5.2)$$

Если в уравнение ввести $x_2 - x_1 = \delta$ - толщина стенки, получим

$$q = \lambda/\delta (t_1 - t_2) = (\lambda/\delta)\Delta t \quad (5.3)$$

или $q = (t_1 - t_2)/(\delta/\lambda)$. (5.4)

Уравнение (5.4) является расчётной формулой теплопроводности плоской стенки. Оно связывает q , λ , δ , Δt .

Зная любые три величины, можно всегда найти четвёртую.

(δ/λ) – называется термическим сопротивлением стенки (R).

Определив по формуле (5.4) плотность теплового потока, можно определить общее количество тепла Q в джоулях, переданное через площадь поверхности плоской стенки за время τ .

$$Q = qA\tau = (\lambda/\delta)\Delta tA\tau, \quad (5.5)$$

где A - площадь поверхности.

Задание

- 1 Определить температуры теплоносителя на входе (t_1) и выходе (t_2) рекуператора.
- 2 Определить температуры нагреваемой жидкости на входе (t_3) и выходе (t_4) рекуператора.
- 3 Определить количество тепла переданного теплоносителем нагреваемой жидкости при противотоке.

Проведение опыта

Чтобы получить полное представление о характере изменения температур жидкостей в рекуператоре, необходимо перед началом эксперимента подать теплоноситель во внутреннюю трубку, а нагреваемую жидкость во внешнюю и замерить температуры на входе и выходе. Температуру теплоносителя на входе (t_1) поддерживать постоянной в течение всего эксперимента. Так как длина установки (рекуператора) небольшая, то (t_2) в процессе работы практически равна (t_1)

Лабораторная работа основана на передачи тепла через стенку.

Теплопроводность стали трубки - λ , Вт/(м град).

Толщина стенки внутренней трубки – δ , м.

Температуру стен трубок внутри рекуператора принимаем равной температуре омывающей жидкости.

При проведении работы замерять температуру воды $(t_1), (t_2), (t_3), (t_4)$ рекуператора через 10 мин. Замеры производить до тех пор, пока (t_4) не станет постоянной. Результаты замеров температур заносить в таблицу.

Обработка результатов измерений.

Количество тепла проходящего в продолжение 1 ч. при стационарном потоке через сечение $F \text{ м}^2$ составляет:

$$Q = \lambda F \frac{t_1 - t_4}{\delta} \quad [\text{Вт}], \quad (5.6)$$

λ – коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м град);

t_1 и t_4 - температура на ограничивающих стенку поверхностях, °С;

δ – толщина стенки трубки, м;

F – площадь поверхности внутренней трубки рекуператора, м^2 ;

Критерием для оценки эффективности установки является средний температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$, т.е. средняя разность температур греющей и нагреваемой жидкости.

Для выполнения работы необходимо:

- 1 Замерить толщину стенки внутренней трубки рекуператора (δ), м.
- 2 Замерить площадь поверхности внутренней трубки рекуператора (F), м.
- 3 По таблице 5.1 определить коэффициент теплопроводности нержавеющей стали (λ) при температуре t_1 , Вт/(м град.С).
- 4 Через каждые 10 минут производить замеры температур $(t_1), (t_2), (t_3), (t_4)$, °С.
- 5 По полученным температурам и коэффициентам теплопроводности рассчитать количество тепла переданного нагреваемой жидкости – $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ в соответствии с температурой и коэффициентом теплопроводности, Вт.
- 6 Все полученные результаты вносить в таблицу 5.2.
- 7 Определить максимальное количество тепла, переданное нагреваемой жидкости в течение 1 часа, 2 часов.
- 8 Построить график зависимости изменения температуры (t_4) от времени (τ) при противотоке.
- 9 Построить график зависимости изменения количества тепла переданное нагреваемой жидкости (Q) от времени (τ) при противотоке.

Таблица 5.1. Коэффициенты теплопроводности легированных сталей
(при комнатной температуре)

Сталь	Состав стали, %					Вт/(м град.С)
	С	Si	Mn	Ni	Cr	
Нержавеющая	0,15 – 0,25	0,4	0,4	6,0 – 8,0	18 - 22	16,7
То же	0,32 – 0,4	2,3 – 2,9	0,5 – 0,7	23 - 27	18 - 20	13,0
Жаропрочная	0,25 – 0,3	1,8 – 2,2	0,5 – 0,7	14 - 15	19 - 20	13,0
То же	0,7 – 0,8	0,8 – 1,1	0,6 – 0,8	56 - 60	15 - 17	16,7
То же	0,25 – 0,3	0,3 – 0,5	0,3 – 0,5	-	28 - 32	18,8
Хромомолибдено- вая	0,36	0,2	0,62	0,23 Mo	1,16	33,4
Хромистая	0,1 – 0,2	0,5	-	-	4,6	36
Быстрорежущая	0,7	0,2	0,3	6,0	15 – 18W	31,4

Таблица 5.2.

Номера замеров	Время замера τ , мин.	t_1 , °С	t_2 , °С	t_3 , °С	t_4 , °С	λ , Вт/(м град)	Q, Вт.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- титульный лист.
- наименование и цель работы.
- схему опытной установки.
- таблицу наблюдений.
- обработку результатов опыта.
- выводы по результатам работы

Контрольные вопросы

- 1 Что такое температурный градиент?
- 2 Что такое тепловой поток и температурное поле?
- 3 Как определить плотность теплового потока?
- 4 Как определить потери тепла через плоскую однослойную стенку?
- 5 Как определить потери тепла через плоскую многослойную стенку?
- 6 Как определить потери тепла через цилиндрическую стенку?
- 7 Как определить коэффициент теплоотдачи?
- 8 Что такое теплопередача? Способы передачи теплоты
- 9 Напишите закон Фурье
- 10 Уравнение теплопроводности для однослойной стенки.
- 11 Уравнение теплопроводности многослойной стенки.
- 12 Уравнение теплопроводности для цилиндрической стенки.
- 13 Что такое конвекция и конвективный теплообмен?
- 14 Что такое ламинарное и турбулентное движение?
- 15 Что такое свободное и вынужденное движение?
- 16 Факторы, вызывающие теплообмен излучением.
- 17 Как определить поток излучения?
- 18 Закон Кирхгофа. Закон Стефана–Больцмана.

Подписи исполнителей

Подпись преподавателя

6 Лабораторная работа № 4.

Определение потерь тепла через стенку теплового агрегата

Количество аудиторных часов – 4 часа.

Количество часов на СРС - 2 часа.

Цель работы:

- 1 Закрепление знаний по разделу "Теплопередача", темы:
 - Теплопроводность однослойной стенки.
 - Теплопроводность плоской многослойной стенки.
 - Теплопроводность цилиндрической стенки.
- 2 Определение потерь тепла через стенку теплового агрегата (Q), Вт.
- 3 Освоение работы тепловых агрегатов.

Необходимое оборудование и материалы

- 1 Тепловой агрегат (муфельная или камерная печь), 1 шт.
- 2 Термопары, 2 шт.
- 3 Потенциометры, 2 шт.

Экспериментальная установка

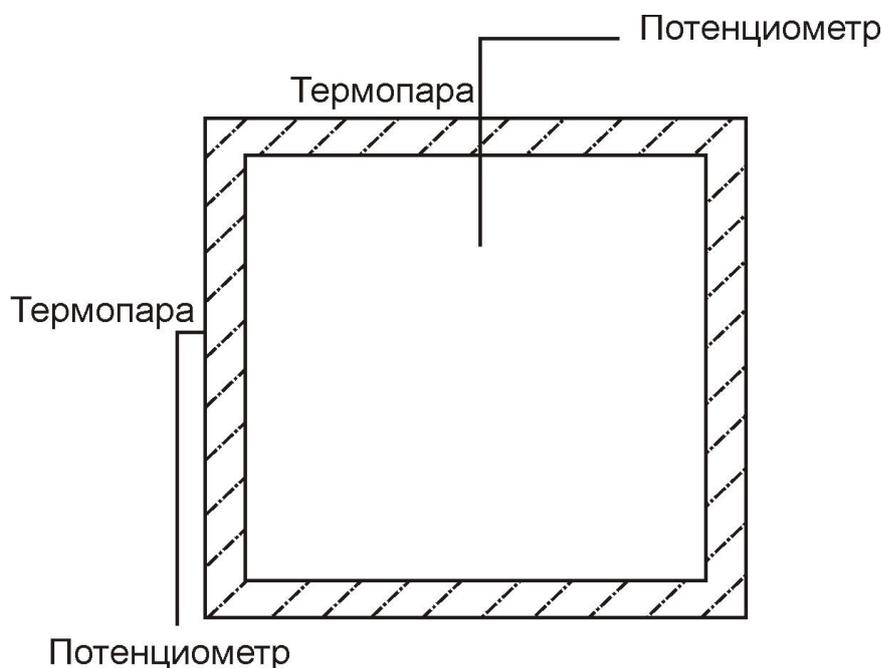


Рис.6.1. Схема экспериментальной установки определения потерь тепла через стенку

Экспериментальная установка представляет собой камерную печь. Кладка печи выполнена из:

1 огнеупорного материала:

- толщина δ_1 , м,
- теплопроводность λ_1 Вт/(м град),

2 металлического листа:

- толщина δ_2 , мм,
- теплопроводность λ_2 Вт/(м град).

Для измерения температуры в рабочем канале устанавливают, а к внешней поверхности стенки печи прикрепляют термопары.

Теоретические основы метода

В практике большое значение имеет процесс передачи тепла через плоскую стенку, состоящую из нескольких слоёв материала с различной теплопроводностью.

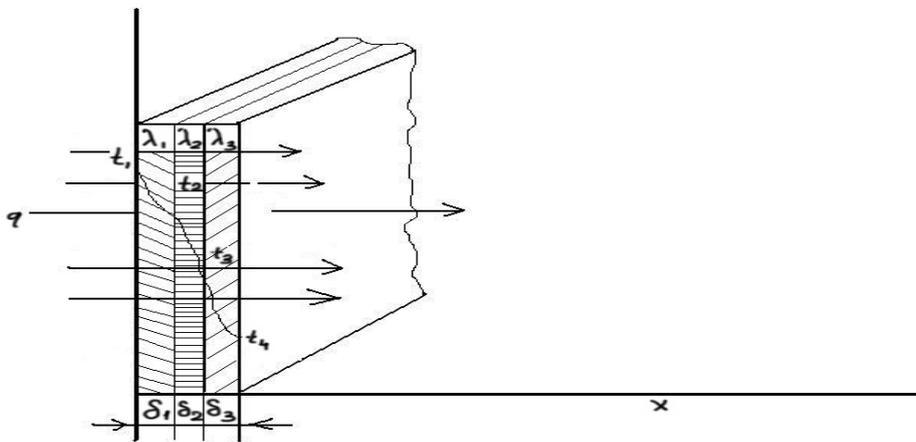


Рис. 6.2. Передача тепла теплопроводностью через плоскую трёхслойную стенку.

Рассмотрим передачу тепла теплопроводностью через плоскую трёхслойную стенку (рис.6.2.). Все слои такой стенки плотно прилегают друг к другу. Толщины слоёв обозначены δ_1 , δ_2 , δ_3 , а теплопроводность каждого материала λ_1 , λ_2 , λ_3 соответственно. Известны также температуры наружных поверхностей t_1 и t_4 . Температуры t_2 и t_3 неизвестны. Так как рассматривается стационарный режим, то плотность теплового потока q , проходящего через каждый слой стенки, по значению постоянна и для всех слоёв одинакова, но на своём пути она преодолевает местное термическое сопротивление (δ/λ) .

Поэтому для каждого слоя имеем:

$$q = (t_1 - t_2) / (\delta_1 / \lambda_1); \quad q = (t_2 - t_3) / (\delta_2 / \lambda_2); \quad q = (t_3 - t_4) / (\delta_3 / \lambda_3).$$

Из этих равенств можно определить q :

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= q \delta_1 / \lambda_1; \\ t_2 - t_3 &= q \delta_2 / \lambda_2; \end{aligned} \quad (6.1.)$$

$$t_3 - t_4 = q\delta_3 / \lambda_3.$$

Складывая левые и правые части равенства, получим:

$$t_1 - t_4 = q(\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3)$$

или

$$q = \frac{t_1 - t_4}{(\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3)} \quad (6.2.)$$

Из уравнения (6.2) следует, что общее термическое сопротивление многослойной стенки равно

$$R = \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3 \dots + \dots \delta_n / \lambda_n$$

По формулам (6.1) и (6.2.) можно определить значения неизвестных t_2 и t_3 :

$$\begin{aligned} t_2 &= t_1 - q\delta_1 / \lambda_1, \\ t_3 &= t_2 - q\delta_2 / \lambda_2 = t_1 - q(\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2), \end{aligned} \quad (6.3)$$

или

$$t_3 = t_4 + q\delta_3 / \lambda_3.$$

Задание.

- 1 Определить значения температур в рабочем канале печи (t_1), °С.
- 2 Определить значения температур внешней поверхности теплового агрегата (t_2), °С.
- 3 Определить потери тепла через стенку теплового агрегата (Q), Вт.
- 4 Определить скорость подъёма значений температур.
- 5 Построить график зависимости роста значений температуры от времени.
- 6 Построить график зависимости потерь количества тепла от времени.
- 7 Построить график зависимости потерь количества тепла от значений температуры в рабочем канале.

Проведение опыта

Лабораторная работа основана на передаче тепла через стенку. Теплопроводность λ_1 огнеупорного материала в зависимости от температуры определить по таблице 1. Толщина стенки огнеупорной части – δ_1 , мм.

Теплопроводность λ_2 металла внешней части печи в зависимости от температуры определить по таблице в справочнике.

Толщина стенки металла – δ_2 , мм.

Значения коэффициента теплоотдачи конвекцией определяются для различных случаев экспериментальным путём. Для газов при естественной конвекции коэффициент теплоотдачи лежит в пределах 6,0 – 35 Вт/(м² град.С). В данном случае коэффициент теплоотдачи принять равной 8,0 Вт/(м² град.С).

При проведении работы замерять температуру в рабочем канале печи (t_1) и внешней поверхности стенки печи (t_2) через 10 мин. Замеры производить до достижения температуры в рабочем канале 600 °С.

Обработка результатов измерений.

Количество тепла проходящего в течение 1 ч. при стационарном потоке через сечение F, составляет:

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2} F \text{ [Вт]}, \quad (6.4)$$

λ_1 – коэффициент теплопроводности огнеупорной части стенки, Вт/(м град);
 λ_2 – коэффициент теплопроводности металлической части стенки, Вт/(м град);
 t_1 – температура в рабочем канале печи, °С;
 t_2 – температура внешней поверхности печи, °С;
 δ_1 – толщина огнеупорной части стенки печи, м;
 δ_2 – толщина металлической части стенки печи, м;
 α – коэффициент теплоотдачи – принять равной 8,0, Вт/(м² град.С);
 F – площадь поверхности стенки печи, м².

Для выполнения работы необходимо:

1. Замерить толщину огнеупорной части кладки печи стенки (δ_1), мм.
2. Замерить толщину металлической части печи (δ_2), мм.
3. Замерить площадь поверхности исследуемой части стенки печи (F), м².
4. По справочнику определить коэффициент теплопроводности огнеупорного материала (λ_1) при температуре t_1 .
5. По справочнику определить коэффициент теплопроводности металла (λ_2) при температуре t_2 . Внешняя поверхность печи выполнена из стали марки Ст3.
7. Через каждые 10 минут производить замеры температур (t_1), (t_2).
8. По полученным температурам и коэффициентам теплопроводности рассчитать потери тепла через стенку в соответствии с температурой и коэффициентом теплопроводности – $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$.
9. Определить потери тепла через стенку в течение 1 часа, 2 часов.
10. Построить график зависимости изменения значений температуры в рабочем канале печи (t_2) от времени (τ);
11. Построить график зависимости изменений количества потери тепла через стенку печи (Q) от времени (τ);
11. Построить график зависимости потерь количества тепла от температуры в рабочем канале печи.
12. Полученные результаты свести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

Номера замеров	Время замера τ , мин.	t_1 , °С	t_2 , °С	λ_1 , Вт/(м град)	λ_2 , Вт/(м град)	Q, Вт.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- титульный лист.
- наименование и цель работы.
- схему опытной установки.
- таблицу наблюдений.
- обработку результатов опыта.
- выводы по результатам работы

Контрольные вопросы

- 1 Что такое теплопроводность?
- 2 Что такое температурное поле?
- 3 Что такое температурный градиент?
- 4 Что такое тепловой поток?
- 5 Как определить плотность теплового потока?
- 6 Уравнение Фурье.
- 7 Уравнение теплопроводности для однослойной стенки.
- 8 Уравнение теплопроводности для многослойной стенки.
- 9 Уравнение теплопроводности для цилиндрической стенки.
- 10 Что такое ламинарное и турбулентное движение?
- 11 Что такое свободное и вынужденное движение?

Подписи исполнителей

Подпись преподавателя

7 Лабораторная работа № 5

Приборы и методы определения параметров рабочих тел

Количество аудиторных часов – 4 часа.

Количество часов на СРС - 2 часа.

Цель работы

- 1 Закрепление знаний по разделу "Термодинамика".
- 2 Изучить устройство приборов и методы определения теплофизических параметров.

Необходимое оборудование и материалы

- 1 Трубчатый (пружинный) манометр.
- 2 Дифференциальные мембранные манометры.
- 3 U – образный жидкостный манометр.
- 4 Пьезометр.
- 5 Трубка Прандтля.
- 6 Ртутные термометры.
- 7 Термопары.
- 8 Потенциометр.
- 9 Милливольтметр.
- 10 Оптический пирометр.
- 11 Камерная печь.
- 12 Трубопровод, с установленными на ней приборами измерения давления и скорости.

Теоретические основы

Измерение давления

Для измерения давления в экспериментальных и промышленных установках используют различные виды манометров. В зависимости от пределов измеряемого давления и требуемой точности выбирают соответствующий тип манометра.

По принципу действия манометры делят на жидкостные и пружинные.

Жидкостные манометры. Жидкостные манометры представляют собой U – образную трубку, частично заполненную водой или ртутью. Одно колено трубки присоединяют к испытываемому объёму, а второе либо остаётся открытым и сообщается с атмосферой, либо из него откачивают воздух до высокого вакуума и запаивают.

В манометрах с запаянным коленом разность уровней ртути в обоих коленах непосредственно даёт абсолютное давление в миллиметрах ртутного столба. Самым простым жидкостным прибором является пьезометр. Он состоит из стеклянной трубки небольшого диаметра. Верхняя её часть открыта и сообщается с атмосферой, нижняя соединена с резервуаром, в котором находится жидкость под давлением p (выше атмосферного).

Под действием этого давления жидкость из резервуара поднимается по пьезометрической трубке вверх на некоторую высоту h , называемую пьезометрической высотой. Пьезометрическая высота характеризует избыточное давление p в сосуде и служит мерой для определения его значения:

$$p = \rho gh.$$

Абсолютное давление на уровне нуля шкалы пьезометра определяется основным уравнением гидростатики. Атмосферное давление p_0 определяют по барометру, плотность жидкости ρ – по таблицам, а значение h отсчитывают по шкале пьезометра.

Пьезометр является очень точным прибором. Однако его применяют для измерения давлений не выше 0,5 ат ≈ 50 кПа = 0,05 МПа. Измерение больших давлений требует применение очень больших пьезометрических трубок, что создаёт определённые неудобства.

Для измерения более высоких давлений применяют ртутные манометры. Так как плотность ртути в 13,6 раза больше плотности воды, трубки в ртутных манометрах соответственно могут быть короче.

К ним относится ртутно – чашечный манометр, который состоит из чашечки с ртутью, стеклянной трубки и шкалы. Абсолютное давление на уровне нуля шкалы определяется основным уравнением гидростатики

$$p_{абс} = p_0 + \rho_{рт} gh,$$

где $\rho_{рт}$ – плотность ртути.

Абсолютное давление в центре резервуара вычисляется с поправкой к показаниям манометра

$$p_{абс} = p_0 + \rho_{рт} gh - \rho gh_0,$$

где ρ – плотность жидкости в сосуде;

h_0 – высота столба этой жидкости.

Для измерения разности давлений Δp в двух точках одного трубопровода или для измерения разности давлений в двух резервуарах применяют так называемые дифференциальные манометры.

Если жидкость в резервуарах имеет одинаковую плотность, то разность давлений в двух точках 1 и 2, расположенных на одной высоте, определяется по формуле

$$\Delta p = gh(\rho_{рт} - \rho),$$

где $\rho_{рт}$ и ρ плотности ртути и измеряемой жидкости;

h – разность высот ртути, возникшая под действием разности давлений.

Жидкостные манометры используют в лабораторной практике и измеряют ими сравнительно невысокие давления.

Пружинные манометры. Там, где высокие давления, используют пружинные манометры.

Основной частью пружинного манометра является полая металлическая трубка. Один её конец запаян и соединён с механизмом, на котором укреплена стрелка, скользящая по круглому циферблату. Другой

конец трубки сообщается с исследуемым объёмом посредством ниппеля. Через этот конец в трубку поступает жидкость, давление которой необходимо измерить. Под действием давления поступившей жидкости трубка стремится выпрямиться. Так как её запаянный конец связан с механизмом, приводящим в движение стрелку, то она отклоняясь, показывает величину давления жидкости. Циферблат обычно градуируется непосредственно в единицах давления. Иногда манометры оборудуют записывающим механизмом.

Приборы измерения скорости. Простейшим прибором для измерения скорости в открытом потоке служит трубка Пито. Она представляет собой изогнутую трубку небольшого диаметра, установленную в потоке движущейся жидкости открытым концом навстречу течению, и так, что ось трубки совпадает с направлением потока.

При этом в вертикальной части трубки жидкость поднимается на высоту h , равную скоростному напору $h = v^2/(2g)$. Откуда

$$v = \xi_1 \sqrt{2gh}, \quad (7.1)$$

где ξ_1 — находят экспериментально для каждой трубки.

Трубку Пито можно использовать и для замера скорости в закрытых трубопроводах, применяя её совместно с обычной пьезометрической трубкой.

Устройство, сочетающее, трубку Пито и пьезометрическую трубку, называют трубкой Прандтля. В этом устройстве трубка Пито показывает полный напор жидкости в трубе $v^2/(2g) + p/(\rho g)$, а пьезометрическая трубка — статистический напор $p/(\rho g)$ в той же самой трубе. Разность этих напоров — $v^2/(2g)$ равна разности уровней Δh в обеих трубках. Таким образом,

$$v = \sqrt{2g\Delta h}.$$

Для того чтобы учесть влияние вязкости и внесённое трубкой изменение в распределение скоростей и давлений в потоке, так же как и для трубки Пито, вводят поправочный коэффициент ξ_2 :

$$v = \xi_2 \sqrt{2g\Delta h}.$$

Измерение температуры

Температура есть мера интенсивности теплового движения молекул; её численная величина однозначно связана с величиной средней кинетической энергии молекул вещества. Температуру следует рассматривать как меру средней кинетической энергии молекул.

В настоящее время приняты две температурные шкалы: термодинамическая и международная практическая. За нуль термодинамической шкалы (К) принята температура вещества (тела) в таком (идеализированном) состоянии, в котором отсутствует хаотическое тепловое движение его молекул и атомов. По этой шкале температура всегда положительна ($T > 0$).

За единицу температуры по Международной практической температурной шкале принят градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). За нуль принята температура таяния льда.

Соотношение между температурами по любой из этих шкал определяется равенством:

$$T = t + 273,15^{\circ}\text{C},$$

где: T – абсолютная температура, К.

t – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Измерение температуры в тепловых агрегатах осуществляют при помощи: стеклянных и манометрических термометров, термометров сопротивления, термометров термоэлектрических в комплекте с милливольтметрами и потенциометрами и оптических пирометров.

Выбор прибора для измерения температуры производят в зависимости от технологического процесса, цели измерения, диапазона измеряемой температуры и точности измерения.

Жидкостно-стеклянные термометры. Самое широкое распространение имеют жидкостно – стеклянные термометры, отличающиеся простотой и надёжностью. Ртутные термометры применяют для измерения температур от -25 до 500°C . Приборы с органическими жидкостями применяют для измерения низких температур. Стеклянные жидкостные термометры широко применяют в технологических установках для визуальных наблюдений за температурой относительно медленно протекающих процессов.

Технические ртутные термометры устанавливают в чехлах. Для уменьшения инерционности полость между чехлом и погруженной нижней частью термометра заполняется маслом (при температуре до 200°C или металлическими опилками (при температуре свыше 200°C).

Термометрами манометрическими измеряют температуру до $+300^{\circ}\text{C}$ неагрессивных газов, паров и жидкостей при давлении среды до 6 МН/м^2 .

Действие манометрического термометра основано на свойстве газа, заключённого в замкнутом объёме, изменять своё давление в зависимости от температуры.

Манометрические термометры могут быть выполнены с записывающими устройствами.

К недостаткам манометрических приборов можно отнести ограниченное расстояние от точки замера до вторичного прибора, длина капилляра и запаздывание показаний, составляющее для газовых термометров 80 а для паровых 40 с. При измерении температуры капилляр и вторичный прибор не должны находиться вблизи нагревательных и охлаждающих устройств.

Термометры сопротивления электрические подразделяют на платиновые и медные. Платиновые термометры применяют для измерения температуры от $+260$ до $+650$, медные от $+50$ до $+180^{\circ}\text{C}$.

Измерение температур термометрами сопротивления основано на свойстве проводника *изменять* своё электрическое сопротивление в зависимости от температуры. В зависимости от измеряемой среды термометры сопротивления изготавливают в чехлах из углеродистой стали 20 или нержавеющей стали марки Х18Н10Т. Подключение термометров к логометру может быть выполнена по двух или трёхпроводной схеме.

Термометры термоэлектрические. Действие их основано на явлении термоэлектрического эффекта, получающегося при нагревании спая двух разнородных проводников. Величина термоэлектродвижущейся силы (э.д.с.) зависит от материала электродов.

Термоэлектродвижущуюся силу измеряют вторичным прибором: милливольтметром или электронным потенциометром, при этом температура свободного конца термопары должна поддерживаться постоянной.

В настоящее время наибольшее распространение получили платинородий – платиновые (ТПП) с пределом измерения до 1600°C, хромель – алюмелевые (ТХА) с пределом измерения до 1000°C, хромель – копелевые (ТХК) с пределом измерения 600 °С.

Пирометры излучения. Отличительная особенность – не требует непосредственного контакта с нагреваемым объектом.

Оптические пирометры основаны на принципе сравнения яркости свечения двух тел, из которых одно тело является излучателем, а другое нитью лампы накаливания пирометра. Нить лампы накаливания проектируется на оптическом изображении накалённой поверхности тела, накал нити меняется вручную с помощью реостата. В момент, когда нить становится невидимой на фоне раскалённого тела, наблюдатель производит отсчёт температуры измеряемого тела по шкале прибора. Прибор переносной и предназначен для периодических измерений. Прибор имеет шкалу с тремя пределами: 800 – 2000, 1200 – 3200, 1500 - 6000°C.

Фотоэлектрический пирометр предназначен для непрерывного бесконтактного измерения и записи яркостной температуры тел нагретых до видимого свечения. Его действие основано на свойстве фотоэлемента изменять ток пропорционально падающему на него лучистому потоку. Выпускают фотоэлектрические пирометры с температурной шкалой до 2000°C (по отдельным заказам до 4000°C)

Задание.

- 1 Изучить устройство приборов измерения давления.
- 2 Изучить единицы измерения давления и их соотношения.
- 3 Установка приборов и измерение давления в системе.
- 4 Изучить шкалы измерения температур и их соотношения.
- 5 Изготовление термопар.
- 6 Измерение термо э.д.с.
- 7 Подключение термопар к потенциометру и измерение температуры системы.

Проведение работ.

Изучить единицы измерения давления и их взаимоотношения. Изучить назначение, устройство и принципы работы манометров. Работа с манометрами в рабочем режиме.

Изучение единиц измерения температуры. Изучение устройства термопары. Виды термопар и их назначения. Изготовление термопар. Измерение термо – э.д.с. термопар. Устройство потенциометра. Устройство термометра сопротивления. Установка термопар и измерение температур в рабочем режиме.

Обработка результатов измерений.

- 1 Описать устройство и принципы работы манометров.
- 2 Описать единицы измерения давления и перевод из одной в другую.
- 3 Описать виды термопар и пределы их измерения.
- 4 Снять показания манометров и определить давление в системе.
- 5 Изучить устройство и работу милливольтметра и потенциометра.
- 6 Изготовить термопару и установить в нагревательную установку.
- 7 Подключить термопары к милливольтметру и потенциометру.
- 8 Снять показания приборов и определить изменение температуры в тепловом агрегате.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- титульный лист.
- наименование и цель работы.
- схему опытной установки.
- таблицу наблюдений.
- обработку результатов опыта.
- выводы по результатам работы

Подписи исполнителей

Подпись преподавателя

Контрольные вопросы

- 1 Приборы для измерения давления.
- 2 Перечислите единицы измерения давления.
- 3 Устройство жидкостных манометров.
- 4 Устройство пружинных манометров.
- 5 Устройство для замера скорости потока.
- 6 Температурные шкалы.
- 7 Жидкостно-стеклянные термометры и их принцип работы.
- 8 Типы термопар и их устройство.
- 9 На чём основано действие термоэлектрических термометров.
- 10 Вторичные приборы для замера температуры.

8 Лабораторная работа № 6.

Определение влажности твёрдого топлива

Количество аудиторных часов – 8 часов.

Количество часов на СРС - 4 часа.

Цель работы

- 1 Закрепление и знаний по разделу «Топливо».
- 2 Изучить методику определения влажности твёрдого топлива.
- 3 Определить влажность твёрдого топлива.

Необходимое оборудование и материалы

- 1 Шкафы сушильные электрические с терморегулятором обеспечивающие устойчивую температуру нагрева от 105 до 110°C, с отверстиями для естественной вентиляции или установкой для обмена воздуха или азота.
- 2 Шкафы сушильные для подсушивания проб с электрическим или газовым обогревом, с регулированием температуры от 40 до (50±5)°C естественной или искусственной вентиляцией или с обменом нагретого азота.
- 3 Термометр ртутный до 120°C с ценой деления шкалы 1°.
- 4 Бюксы стеклянные или алюминиевые с крышками для определения влаги в лабораторной или аналитической пробе. Диаметры бюкс должны быть такими, чтобы на 1 см² поверхности приходилось не более 0,15 г топлива для аналитической пробы массой около 1 г или 0,30 г для 10 г лабораторной пробы крупностью менее 3 мм.
- 5 Противни из неокисляющегося металла для подсушивания проб.
- 6 Эксикаторы, наполненные свежепросушенным силикагелем или другими высушивающими веществами.
- 7 Аналитические или электронные весы.

Теоретические основы метода

Определение общей влаги может производиться как сумма внешней влаги и влаги воздушно-сухого топлива (двухступенчатый способ).

Сущность метода определения внешней влаги заключается в высушивании пробы при комнатной температуре или в сушильном шкафу с температурой не более 40°C для бурых углей и не более 50°C для каменных углей и горючих сланцев и вычислении массовой доли влаги по потере в массе.

Влагу воздушно-сухого топлива определяют по лабораторной пробе (крупностью не более 3 мм и массой не менее 500 г) после определения внешней влаги сушкой при температуре от 105 до 110°C или методом дистилляции.

Метод определения влаги аналитической пробы заключается в высушивании навески аналитической пробы топлива (максимальный размер

зерен не более 2 мм) в сушильном шкафу при температуре 105-110°C и вычислении массовой доли влаги по потере в массе.

Задание

- 1 Изучить метод определения влажности твёрдого топлива.
- 2 Произвести отбор и подготовку проб.
- 3 Определить внешнюю влагу.
- 4 Определить влагу воздушно-сухого топлива.
- 5 Определить влажность твёрдого топлива.

Проведение работ

1 Определение внешней влаги

1.1 Сущность метода заключается в высушивании пробы при комнатной температуре или в сушильном шкафу с температурой не более 40°C для бурых углей и не более 50°C для каменных углей и горючих сланцев и вычислении массовой доли влаги по потере в массе.

1.2 Подготовка пробы

Максимальный размер зерна пробы для определения внешней влаги не должен превышать 20 мм. Масса пробы в килограммах должна быть не менее 0,1 максимального размера куска в миллиметрах, но не менее 0,5 кг.

1.3 Проведение испытания.

Пробу разравнивают на взвешенном противне так, чтобы на 1 дм² поверхности приходилось не более 100 г пробы. Противень с пробой взвешивают с точностью до 0,05 % массы навески и ставят для свободной сушки в помещении с хорошей вентиляцией или в сушильный шкаф.

Длительность сушки в сушильном шкафу не должна превышать 8 ч. Для бурых углей и лигнитов с содержанием общей влаги более 35 % время сушки может быть увеличено. После окончания сушки в сушильном шкафу противни с пробами вынимают и оставляют для свободной сушки при комнатной температуре до тех пор, пока разность масс за последний час между двумя последними взвешиваниями не будет превышать 0,3 % первичной массы навески для бурых углей и 0,1 % - для каменных углей и горючих сланцев. В течение сушки, а также после каждого отдельного взвешивания пробу перемешивают так, чтобы не возникали потери пробы.

2 Определение влаги воздушно-сухого топлива.

2.1 Сущность метода.

Влагу воздушно-сухого топлива определяют по лабораторной пробе (крупностью не более 3 мм и массой не менее 500 г) после определения внешней влаги сушкой при температуре от 105 до 110°C или методом дистилляции.

2.2 Проведение испытания.

Из лабораторной пробы отбирают в бюксы навеску массой около 10 г. Открытые бюксы помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры от 105 до 110°C, и выдерживают при этой температуре не менее:

60 мин - угли каменные и горючие сланцы;

90 мин - угли бурые и лигниты;

120 мин - антрацит.

2.3 Вынимают бюксы из сушильного шкафа, накрывают крышкой, охлаждают на металлической подставке 2-3 мин, затем в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивают. Проводят контрольные сушки в течение 30 мин до тех пор, пока расхождение между двумя последними взвешиваниями будет не более 0,1 %. За результат принимают самую низкую массу.

3 Определение влаги аналитической пробы

3.1 Сущность метода заключается в высушивании навески аналитической пробы топлива (максимальный размер зерен не более 2 мм) в сушильном шкафу при температуре 105-110°C и вычислении массовой доли влаги по потере в массе.

3.2 Проведение испытания.

Из аналитической пробы топлива во взвешенную бюксу отбирают около 1 г топлива. Бюксу с навеской топлива помещают в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры 105-110°C и при этой температуре сушат не менее:

30 мин - каменные угли, антрацит и горючие сланцы;

60 мин - бурые угли и лигниты.

После окончания сушки бюксы вынимают из сушильного шкафа, закрывают крышками и охлаждают 2-3 мин на металлической подставке, затем в эксикаторе до комнатной температуры, после чего взвешивают. Проводят контрольные сушки в течение 30 мин каждая до тех пор, пока расхождение между двумя взвешиваниями будет не более 0,001 г. За результат принимают самую низкую массу.

Обработка результатов

Массовую долю внешней влаги (W_{ex}), влаги воздушно-сухого топлива (W_h) и аналитической пробы (W^a) в процентах вычисляют по формуле

$$W = \frac{m_1}{m} \cdot 100$$

где m_1 - потеря массы при сушке навески, г;

m - масса навески пробы топлива, г.

Результаты вычисляют с точностью до 0,1 %.

Определение общей влажности

Методика испытаний

Определение общей влаги может производиться как сумма внешней влаги и влаги воздушно-сухого топлива (двухступенчатый способ).

Пробу и контейнер взвешивают с точностью до 0,1 % (при крупности зерен менее 3 мм). Взвешивают сухой пустой противень, размещают пробу возможно плотнее, приблизительно 1 г угля на 1 см² поверхности. Контейнер

с влажной пробой, прилипшей к нему, высушивают при нагревании, затем переносят оставшуюся пробу на противень и взвешивают сухой пустой контейнер. Противень с пробой помещают в сушильный шкаф, нагретый до температуры 105-110 °С. Нагревают противень с пробой угля до постоянной массы, взвешивая в горячем состоянии для предотвращения в абсорбции влаги во время охлаждения. Требуемое время 3-6 ч или более, в зависимости от размера частиц угля.

Обработка результатов

Массовую долю общей влаги (W_t) в процентах вычисляют по формулам:

а) при сушке на противне

$$W_t = \frac{(m_1 - m_2) - (m_3 - m_4)}{m_1 - m_2} \cdot 100$$

где m_1 - масса контейнера с исходной пробой, г;

m_2 - масса пустого противня, г;

m_3 - масса противня с пробой после нагревания, г;

m_4 - масса сухого пустого контейнера, г.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- титульный лист.
- наименование и цель работы.
- схему опытной установки.
- таблицу наблюдений.
- обработку результатов опыта.
- выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

- 1 Виды и классификация топлива.
- 2 Химический состав твёрдого и жидкого топлива.
- 3 Химический состав газообразного топлива.
- 4 Тепловые эффекты реакции горения.
- 5 Теплота сгорания топлива.
- 6 Как определить теоретический расход воздуха на горение жидкого и твёрдого топлива.

Подписи исполнителей

Подпись преподавателя

9 Лабораторная работа № 7.

Определение зольности твёрдого топлива

Количество аудиторных часов – 4 часа.

Количество часов на СРС - 2 часа.

Цель работы

- 1 Закрепление знаний по разделу «Топливо».
- 2 Изучить методику определения зольности твёрдого топлива.
- 3 Определить зольность твёрдого топлива.

Необходимое оборудование и материалы

- 1 Весы с погрешностью взвешивания не более 0,2 мг.
- 2 Муфельная печь любого типа с максимальной температурой нагрева 900-1000°C, обеспечивающая постоянные температуру и скорость нагрева. Вентиляция муфельной печи должна обеспечивать смену воздуха около пяти раз в минуту.

Допускается применять муфельную печь с естественной вентиляцией.

Альтернативно используют две муфельные печи любого типа. Одна должна обеспечить постоянную температуру и скорость нагрева до 500 °С, вторая – постоянную температуру (815±10) °С.

- 3 Тигли, лодочки для сжигания из кварца, фарфора или платины, глубиной от 8 до 15 мм № 1, 2, 3 по [ГОСТ 9147](#) и ГОСТ 19908.

Размер тигля или лодочки должен быть таким, чтобы на 1 см² поверхности масса пробы топлива не превышала 0,15 г/см² для угля или 0,10 г/см² для кокса.

Применяемые тигли и лодочки должны быть пронумерованы, прокалены до постоянной массы и храниться в эксикаторе с осушающим веществом.

- 4 Изоляционная пластина из кварца толщиной 6 мм. или аналогичное приспособление, размер которого позволяет легко вводить его в муфельную печь.

Допускается использовать керамические пластины из огнеупорного материала толщиной не более 5 мм.

- 5 Термопреобразователь для измерения температуры до 1000 °С по ГОСТ 3044 с измерительным устройством.

- 6 Щипцы тигельные.

- 7 Эксикатор по ГОСТ 25336

Теоретические основы

Кроме сжигания, топливо в некоторых случаях подвергают нагреванию для технологической переработки (например, для получения кокса). Количество выделяемого при горении тепла и физико – химические процессы при нагревании в значительной степени зависят от химического состава топлива. Топливо, подавляющего большинства разновидностей –

органического происхождения, поэтому основным его составляющими являются углерод и водород. В составе топлива обычно находятся кислород, азот и сера также в связанном виде. Перечисленные элементы образуют различные соединения, составляющие основу топлива. Кроме того, в топливе всегда присутствуют вода и зола.

Зола – это негорючая минеральная часть топлива, состоящая из Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 и др.

Содержащаяся в топливе сера может встречаться в виде органической серы (S_o), колчеданной (S_k) и сульфатной (S_c). Органическая сера связана с другими составляющими органической части топлива, колчеданная сера связана с железом в виде FeS_2 , а сульфатная сера входит в сернокислые соединения типа $CaSO_4$, $FeSO_4$. Общее количество серы, таким образом, равно:

$$S_{об} = S_o + S_k + S_c .$$

Органическая и колчеданная сера участвует в процессах горения топлива. Сульфатная сера в горении не участвует.

Влага, которая содержится в топливе, подразделяется на гигроскопическую, химически связанную и внешнюю, которая удерживается механически и теряется при сушке.

Чтобы установить состав топлива, проводят технический и химический анализ. При техническом анализе определяют влагу, летучие и золу. Химический анализ можно выполнить как по элементарному составу (С, Н, О, N, S), так и путём определения содержания отдельных химических соединений (CO , CO_2 , CH_4 и др.). Первый метод анализа применяют для твёрдого и жидкого топлива, второй – для газообразного.

Элементарный анализ проводят с целью определения содержания углерода, водорода, кислорода, азота и серы в процентах по массе. Однако такой метод анализа не даёт возможности судить о том, из каких соединений этих элементов состоит топливо. Элементарный анализ (табл.9.1) даёт представление о топливе как о механической смеси отдельных элементов, что достаточно для проведения необходимых расчётов сжигания топлива.

Таблица 9.1.

Индексы	Элементы					
	С	Н	О	S	А	W
о	Органическая масса					
г	Горючая масса					
с	Сухая масса					
р	Рабочее топливо					

Сущность метода определения зольности твердого топлива заключается в методе медленного озоления. Навеска с твёрдым топливом прокаливается при

температуре 500 °С и при 815°С. По результатам остатков определяют зольность аналитической пробы A , % по массе.

Задание

- 1 Изучить метод определения зольности твёрдого топлива.
- 2 Произвести отбор и подготовку проб.
- 3 Определить зольность твёрдого топлива методом медленного озоления.

Проведение работ

Тигель или лодочку взвешивают, равномерно распределяют 1-2 г пробы и снова взвешивают.

Тигель или лодочку с навеской помещают в муфельную печь при комнатной температуре. В течение 60 мин повышают температуру печи до 500 °С и поддерживают эту температуру в течение 60 мин. Продолжают нагрев до (815 ± 10) °С в той же печи либо, при использовании двух печей, переносят тигель или лодочку во вторую печь, предварительно нагретую до (815 ± 10) °С, и выдерживают при этой температуре не менее 60 мин.

После прокаливания тигель или лодочку вынимают из печи и охлаждают на толстой металлической плите в течение 10 мин, а затем помешают в эксикатор без осушителя. Лодочку или тигель накрыть крышкой.

После охлаждения тигель или лодочку с зольным остатком взвешивают. Проводят контрольные прокаливания при (815 ± 10) °С в течение нескольких 15-минутных периодов до тех пор, пока последующее изменение массы станет не более 1 мг.

Обработка результатов

Зольность аналитической пробы A , % по массе вычисляют по формуле

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100$$

где m_1 – масса тигля, г;

m_2 – масса тигля с пробой, г;

m_3 – масса тигля с золой, г.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- титульный лист.
- наименование и цель работы.
- схему опытной установки.
- таблицу наблюдений.
- обработку результатов опыта.
- выводы по результатам работы

Контрольные вопросы

- 1 Виды и назначение топлива.

- 2 Температура горения топлива.
- 3 Теплофизические свойства топлива.
- 4 Искусственное газообразное топливо.
- 5 Искусственное жидкое топливо.
- 6 Как определить теоретический объем продуктов горения газообразного топлива?
- 7 Как определить температура горения топлива?

Подписи исполнителей

Подпись преподавателя

10 Лабораторная работа № 8.

Энтропийные диаграммы. Определение параметров состояния воды и водяного пара.

Количество аудиторных часов – 4 часа.

Количество часов на СРС - 2 часа.

Цель работы

- 1 Закрепление знаний по разделу «Термодинамика».
- 2 Изучить энтропийные диаграммы.
- 3 Определить параметры воды и водяного пара.

Необходимые материалы

- 1 P-V - диаграмма состояния водяного пара.
- 2 T-S - диаграмма состояния водяного пара.
- 3 I-S–диаграмма водяного пара.

Теоретические основы

Вода. Удельный объем воды при температуре 273К и давлении 0,1 МПа равен $v_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$. Так как плотность является величиной, обратной удельному объёму, $\rho = 1/v$, то плотность воды при 273К $\rho = 1000 \text{ кг/ м}^3$.

Давление насыщения воды при температуре 273К $p_0 = 610,76 \text{ Па}$. Значения удельных внутренней энергии энтальпии для воды при температуре 273К при любых давлениях условно считают равными нулю ($u_0 = 0, i_0 = 0, s_0 = 0$).

Параметры состояния воды при температуре кипения (удельную энтальпию i' , удельную энтропию s' , удельный объём v' и плотность ρ) обычно берут из справочных таблиц водяного пара.

Влажный насыщенный пар. Удельный объём влажного насыщенного пара (рис.10.1.) в какой – то промежуточной точке (например, в точке c) можно определить, рассуждая следующим образом: в точке c доля сухого пара - x , а для воды $(1 - x)$. Исходя из этого объём 1 кг смеси v_x в точке c состоит из объёма $v''x$ сухого пара и объёма $v'(1 - x)$ воды

$$v_x = v''x + v'(1 - x). \quad (10.1.)$$

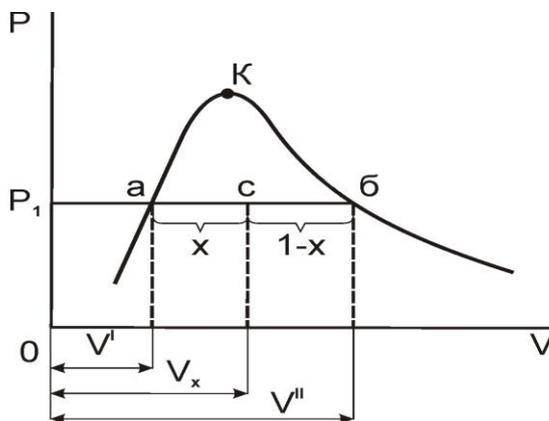


Рис. 10.1. Соотношение воды и пара

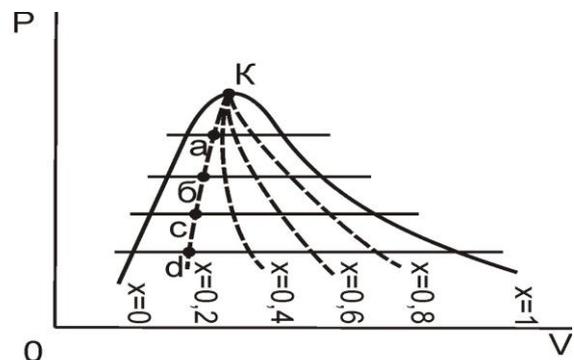


Рис.10.2. Кривые постоянной сухости пара

Из уравнения (10.1.) можно определить степень сухости пара (паросодержание) x :

$$x = (v_x - v') / (v'' - v')$$

Значение удельных объёмов воды v' и сухого насыщенного пара v'' определяют по таблице. При большом паросодержании и невысоком давлении удельный объём, занимаемый жидкостью $v(1 - x)$, очень мал по сравнению с удельным объёмом сухого пара $v''x$. Поэтому обычно им пренебрегают. Для большинства теплофизических расчётов принимают $v_x \approx v''x$. Таким образом, удельный объём влажного насыщенного пара приблизительно равен удельному объёму сухого насыщенного пара того же давления, умноженному на степень сухости.

Плотность влажного насыщенного пара определяется как величина обратная его удельному объёму:

$$\rho_x = 1/v_x \approx 1/v''x = \rho''/x.$$

По такой же схеме определяют остальные параметры влажного насыщенного пара ($r_x, \lambda_x, u_x, s_x, i_x$).

- Удельное количество теплоты фазового превращения: $r_x = r$.
- Удельное количество теплоты влажного насыщенного пара, затраченное на нагревание 1 кг жидкости до температуры кипения и на неполное её испарение: $\lambda_x = q + r$.
- Удельная энтальпия влажного насыщенного пара: $i_x = i' + x(i'' - i') = i' + x r$.
- Удельная внутренняя энергия: $u_x = i_x - p v_x$.
- Удельная энтропия влажного насыщенного пара: $s_x = s' + x(s'' - s') = s' + x r / T_n$, где s' – удельная энтропия воды при температуре кипения.

Кривые постоянной сухости. Если на $p v$ – диаграмме (рис.10.2) соединить между собой точки a, b, c, d , соответствующие определённому значению x (например $x = 0,2$) и принадлежащие различным изобарам, то получится кривая постоянного паросодержания $x = 0,2$. Прделав это построение для различных значений x ($x = 0,4, x = 0,6$ и т.д.), получим семейство кривых постоянной сухости ($x = \text{const}$). Аналогично можно построить кривые сухости и на $T s$ – диаграмме.

Наличие этих кривых на диаграмме даёт возможность определить для любого состояния пара все его основные параметры: давление, объём, температуру и степень сухости.

На энтропийной $T s$ -диаграмме количество теплоты, сообщённое телу или отнятое от него, изображается площадью лежащей под кривой процесса. На практике это усложняет быстрый и точный расчёт. Если на оси ординат энтропийной диаграммы вместо температуры откладывать удельные энтальпии i , то удельная работа при $s = \text{const}$ и количество удельной теплоты при $p = \text{const}$ будут изображаться на этой диаграмме отрезками линий, а не площадями.

$i s$ – диаграммы были созданы во Всесоюзном теплотехническом институте и в настоящее время имеют широкое применение при расчёте паровых и газовых турбин.

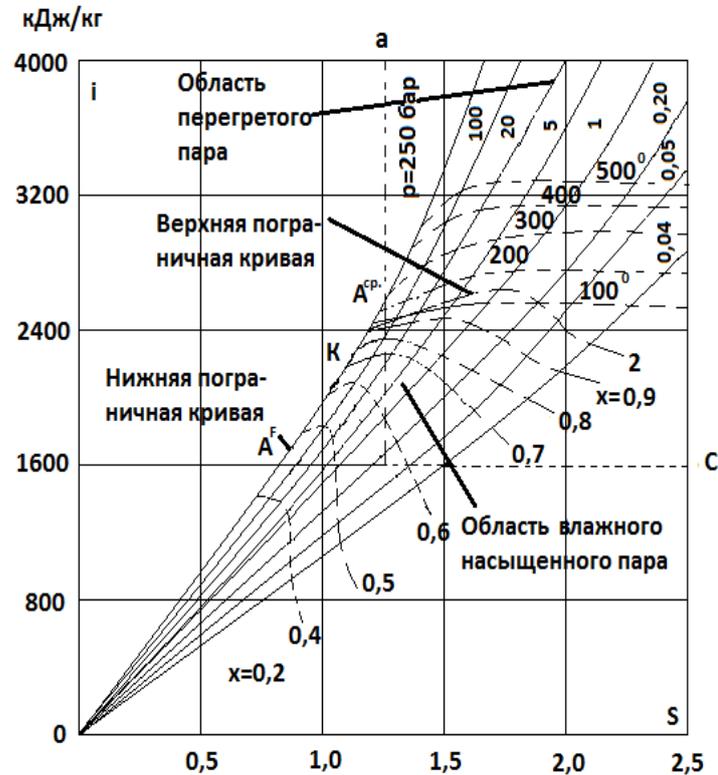


Рис.10.3. is – диаграмма состояния водяного пара

Условно энтропию и энтальпию при 273К (0°С) считают равными нулю. Это состояние на диаграмме изображено началом координат. На диаграмме нанесены две пограничные кривые, сливающиеся в критической точке K . На нижней пограничной кривой A' ($x = 0$) отложены значения удельной энтальпии i' и удельной энтропии s' для различных состояний воды при температуре кипения. На верхней пограничной кривой A'' ($x = 1$) отложены значения i'' и s'' для различных состояний сухого насыщенного пара при температуре кипения. Пограничные кривые делят is – диаграмму на две области. Выше этих кривых расположена область перегретого пара, ниже – область влажного насыщенного пара.

Семейство изобар в области насыщения представляет собой пучок расходящихся прямых линий, начинающихся в нулевой точке. Чем больше давление, тем выше лежат изобары. Так как процесс парообразования протекает при постоянной температуре, то в области насыщения изобары являются одновременно и изотермами. В области перегретого пара от верхней пограничной кривой изобары и изотермы расходятся. Изобары отклоняются влево, а изотермы – вправо. В области больших энтропий, т.е. низких давлений и относительно высоких температур, где перегретый пар по своим

свойствам близок к идеальному газу, постоянной температуре отвечает постоянная энтальпия. Здесь изотермы идут горизонтально и совпадают с линиями $i = \text{const}$. В области влажного насыщенного пара расположены линии постоянного паросодержания $x = \text{const}$ (см. пунктир), также как в pv – и Ts – диаграммах.

Процессы расширения пара в паросиловых установках обычно заканчиваются в области насыщенного пара невысокой влажности $x = 0,7 - 0,75$. Поэтому для увеличения масштаба рабочей части is – диаграммы оси координат переносят выше (рис.10.3.- пунктирные оси координат). Левая часть диаграммы, лежащая вне новых осей координат, отбрасывается. Получается диаграмма «с утопленным нулём». Такими диаграммами пользуются в паротурбинной технике. Однако полная диаграмма необходима для анализа работ некоторых агрегатов (насосов для котлов высокого давления, аккумуляторов пара и др.). На is – диаграмму наносят также изохору – линии постоянного удельного объёма $v = \text{const}$. Они идут несколько круче изобар.

Состояние перегретого пара обычно определяется двумя параметрами: давлением и температурой. На is – диаграмме это состояние определяется точкой пересечения соответствующих изобары и изотермы. Состояние влажного насыщенного пара может быть определена точкой пересечения изобары с линией постоянного паросодержания $x = \text{const}$.

Задание

- 1 Определить параметры воды и пара по pv - диаграмме.
- 2 Определить параметры воды и пара по Ts - диаграмме.
- 3 Определить параметры состояния воды и водяного пара по is – диаграмме.

Проведение работ

Изучение состояния водяного пара на pv - диаграмме. Пограничные кривые. Критическое состояние вещества. Определение параметров состояния водяного пара на Ts - диаграмме. Определение теплоты жидкости. Определение теплоты парообразования. Определение теплоты перегрева. Изучение состояния водяного пара на is - диаграмме. Определение параметров состояния водяного пара на is - диаграмме. Определение характеристик воды. Определение характеристик влажного насыщенного пара. Определение степени сухости пара.

Отчет по работе

Отчет по работе должен включать следующие пункты:

- титульный лист.
- наименование и цель работы.
- схему опытной установки.
- таблицу наблюдений.

- обработку результатов опыта.
- выводы по результатам работы

Контрольные вопросы

- 1 Сущность первого закона термодинамики?
- 2 Что такое энтальпия и энтропия?
- 3 Условия, необходимые для обеспечения обратного процесса.
- 4 Основные условия для получения цикла Карно.
- 5 Изобразите термодинамические процессы на P - V и iS диаграммах.
- 6 Сущность второго закона термодинамики.
- 7 Какую закономерность раскрывает цикл Карно?
- 8 Изобразите процесс парообразования на iS диаграмме.
- 9 Изобразите принципиальную схему паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина, и отобразите цикл её работы в координатах P - V и iS .
- 10 Перечислите способы повышения экономичности паросилового цикла.

Основная литература

1. Фокин В.М, Бойков Г.П, Видин Ю.В. Основы технической теплофизики, 2008 г.
2. Кирилин В.А. Техническая термодинамика. Издательский дом МЭИ, 2008. 496 с.
3. Смирнов М.В. Теоретические основы теплотехники. Изд. Ин-Фомо, 2010.

Дополнительная литература

1. Трофимова Т.И. Курс общей физики, Учебное пособие для вузов, 18-е изд, М – Академия, 2010 -557(3)с. Наличие в библиотеке ТУСУРА – 18 экз.
2. Л. Д. Гинзбург, М. З. Зарипов, 2-е изд., Энергоатомиздат, 1990-223(1)с. Справочное пособие по технике безопасности.
3. Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий. 2009.144 с. ISBN 5-93630-710-2
4. ГЭСНп-2001-07. Теплоэнергетическое оборудование. 2009.