

*Приложение 2.33.1 к ОПОП-П по специальности
13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование*

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Многопрофильный колледж

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

ОП.10 ТЕПЛОМАССООБМЕН

**для обучающихся специальности
13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование**

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Методические указания	4
Практическое занятие №1	4
Практическое занятие №2	6
Практическое занятие №3	9
Практическое занятие №4	11
Практическое занятие №5	13
Практическое занятие №6	15
Практическое занятие №7	18
Практическое занятие №8	20
Лабораторная работа №1	22
Лабораторная работа №2	26

1. ВВЕДЕНИЕ

Важную часть теоретической и профессиональной практической подготовки обучающихся составляют практические и лабораторные занятия.

Состав и содержание практических и лабораторных занятий направлены на реализацию Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования.

Ведущей дидактической целью практических занятий является формирование профессиональных практических умений (умений выполнять определенные действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности).

Ведущей дидактической целью лабораторных занятий является экспериментальное подтверждение и проверка существенных теоретических положений (законов, зависимостей).

В соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «ОП.10 Тепломассообмен» предусмотрено проведение практических и лабораторных занятий.

В результате их выполнения обучающийся должен уметь:

Уд 1 Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий;

Содержание практических и лабораторных занятий ориентировано на подготовку обучающихся к освоению профессиональных модулей программы подготовки специалистов среднего звена по специальности и овладению **профессиональными компетенциями:**

ПК 1.1. Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения

ПК 1.2. Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения.

А также формированию общих компетенций:

ОК 01. Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам;

ОК 02. Использовать современные средства поиска, анализа и интерпретации информации и информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности

Практические и/или лабораторные занятия проводятся в рамках соответствующей темы, после освоения дидактических единиц, которые обеспечивают наличие знаний, необходимых для ее выполнения.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Тема 1.2. Теплопроводность

Практическое занятие №1 Расчет теплопроводности через однослойную, многослойную плоскую и цилиндрическую стенки

Цель:

1. Применять закон Фурье для расчёта тепловых потоков через плоские и цилиндрические стенки;
2. Вычислять термические сопротивления слоёв и температуры на стыках разнородных материалов;
3. Выбирать коэффициенты теплопроводности материалов по заданным таблицам.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19", проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Выполнить индивидуальный расчёт для двух задач (по варианту). Построить график распределения температуры в плоской стенке.

Теоретическая часть:

1.1. Закон Фурье

Основной закон теплопроводности – закон Фурье. Для плоской стенки при стационарном режиме плотность теплового потока определяется по формуле:

$$q = \lambda \frac{(t_1 - t_2)}{\delta}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \quad (1.1)$$

где:

q – плотность теплового потока, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;

t_1 – температура горячей поверхности, °С;

t_2 – температура холодной поверхности, °С;

δ – толщина стенки, м.

1.2. Термическое сопротивление

Термическое сопротивление слоя стенки определяется как:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \right] \quad (1.2)$$

Чем больше термическое сопротивление, тем хуже материал проводит тепло.

1.3. Многослойная плоская стенка

Для многослойной стенки, состоящей из n слоёв с различными материалами, плотность теплового потока рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{(t^1 - t_{\{n+1\}})}{\left(\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right)} \Sigma \quad (1.3)$$

Температура на границе между 1 и $(n+1)$ -м слоями:

$$t_{\{i+1\}} = t^1 - q \cdot \Sigma_{\{j=1\}}^{\{i\}R_j} \quad (1.4)$$

1.4. Цилиндрическая стенка

Для цилиндрической стенки (трубы) используется понятие линейной плотности теплового потока q_l ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ – тепловой поток, приходящийся на 1 метр длины трубы).

Для однослойной цилиндрической стенки:

$$q_l = \frac{(t^1 - t^2)}{\left(\frac{1}{2\pi\lambda}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right)} \quad (1.5)$$

Для многослойной цилиндрической стенки:

$$q_l = 2\pi \frac{(t^1 - t_n^{+1})}{\left(\frac{1}{\lambda_i}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_{\{i+1\}}}{d_i}\right)} \Sigma \quad (1.6)$$

где $d_{\text{вн}}$ и $d_{\text{нар}}$ – внутренний и наружный диаметры слоя.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомьтесь с краткими теоретическими сведениями и формулами (закон Фурье, термическое сопротивление)
2. Изучите справочные данные (Таблица 1.1)
3. Получите исходные данные для вашего варианта (Таблица 1.2 – задача 1, Таблица 1.3 – задача 2)
4. Выполните расчёт по пунктам
5. Постройте график распределения температуры для задачи 1.

Таблица 1.1. Коэффициенты теплопроводности материалов

Материал	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Шамотный кирпич	0,9
Красный кирпич	0,6
Сталь углеродистая	50
Минеральная вата	0,045
Пенополиуретан (ППУ)	0,035
Пенобетон	0,15
Стекловата	0,05

Таблица 1.2. Задача 1. Плоская двухслойная стенка (шамот + красный кирпич)

Вариант	$\delta_1, \text{мм}$	$\delta_2, \text{мм}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$
1	230	250	800	60
2	200	240	750	55
3	250	250	850	70
4	230	300	900	65
5	240	260	780	50
6	220	250	820	60
7	260	240	880	75
8	230	280	760	55

9	210	250	840	65
10	250	270	860	70

Таблица 1.3. Задача 2. Изолированный трубопровод (сталь + минвата)

Вариант	d_m , мм	$\delta_{из}$, мм	t_1 , °C	t_3 , °C
1	57	40	160	40
2	76	50	180	35
3	89	40	150	30
4	108	60	200	45
5	133	70	170	35
6	57	50	190	40
7	76	40	160	30
8	89	60	175	35
9	108	50	210	45
10	133	60	195	40

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) Вычисления
- 2) таблицу результатов
- 3) график для задачи 1
- 4) анализ (сравнение термических сопротивлений).

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- все расчёты верны, график аккуратен, вывод обоснован.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- есть одна негрубая ошибка в расчётах или графике;

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;

- ход решения правилен, но допущены две-три ошибки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- грубые ошибки в уравнениях теплопередачи.

Тема 1.5. Теплопередача

Практическое занятие №2 Расчет теплопередачи в трубном пучке

Цель: научиться рассчитывать коэффициент теплопередачи в цилиндрической трубе;

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19”, проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Определить тепловую мощность Q , коэффициент теплопередачи (чистая труба) и проверить, достаточна ли площадь поверхности при заданных температурах. Если нет – определить необходимое увеличение длины.

Теоретическая часть:

2.1. Уравнение теплопередачи

Процесс передачи теплоты от одного теплоносителя к другому через разделительную стенку называется теплопередачей. Основное уравнение теплопередачи:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}} \quad (2.1)$$

где:

Q – тепловой поток (мощность), Вт;

k – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ;

$\Delta t_{\text{ср}}$ – средний температурный напор, $^{\circ}\text{C}$.

2.2. Коэффициент теплопередачи для цилиндрической стенки

Для чистой цилиндрической стенки (трубы) коэффициент теплопередачи, отнесённый к наружной поверхности, рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{нар}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} + \left(\frac{d_{\text{нар}}}{2\lambda_{\text{ст}}}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}\right) \cdot \left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right)} \quad (2.2)$$

где:

$\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи со стороны наружного теплоносителя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

$\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи со стороны внутреннего теплоносителя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;

$d_{\text{нар}}, d_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметры трубы, м.

2.3. Коэффициенты теплоотдачи

Для вынужденного течения жидкости в трубах (вода):

$$\alpha_{\text{вн}} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_{\text{вн}}}\right) \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (2.3)$$

Число Рейнольдса: $Re = w \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{\nu}$

Для поперечного обтекания трубного пучка газами:

$$\alpha_{\text{нар}} = 0,2 \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{газ}}}{d_{\text{нар}}}\right) \cdot Re_{\text{газ}}^{0,65} \cdot Pr_{\text{газ}}^{0,33} \quad (2.4)$$

2.4. Среднелогарифмический температурный напор

Для противоточной схемы движения теплоносителей:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(\Delta t_6 - \Delta t_m)}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}\right)} \quad (2.5)$$

где:

Δt_6 – большая разность температур на концах теплообменника;

Δt_m – меньшая разность температур на концах теплообменника.

2.5. Теплофизические свойства воды и воздуха

Таблица 2.1 Свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
60	983	4,18	0,654	0,478	3,01
80	972	4,20	0,670	0,365	2,23
100	958	4,22	0,682	0,295	1,75

Таблица 2.2 Свойства сухого воздуха при атмосферном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
200	3,93	34,85	0,68
400	5,21	63,09	0,69
600	6,22	96,84	0,70

Порядок выполнения работы:

1. Изучите основные формулы (уравнение теплопередачи, коэффициент k , среднее логарифмический напор);
2. По таблицам 2.1 и 2.2 определите свойства воды и газов;
3. Рассчитайте $\alpha_{\text{вн}}$ и $\alpha_{\text{нар}}$ по критериальным уравнениям;
4. Вычислите $k_{\text{нар}}, Q, \Delta t_{\text{ср}}, F_{\text{треб}}$;
5. Сравните $F_{\text{треб}}$ с $F_{\text{факт}}$, сделайте вывод;
6. Оцените влияние загрязнений ($R_f = 0,0002$).

Таблица 2.3 Исходные данные

При $d_{\text{нар}} = 38 \text{ мм}, d_{\text{вн}} = 32 \text{ мм}, L = 2,5 \text{ м}, N = 40$

Вариант	$t_{\text{вод. вх}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вод. вых}}, ^\circ\text{C}$	$G_{\text{в}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$t_{\text{газ. вх}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{газ. вых}}, ^\circ\text{C}$	$w_{\text{газ}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$
1	60	90	0,8	400	250	8
2	70	95	1,0	450	280	9
3	50	85	0,6	380	240	7
4	80	100	1,2	420	270	10
5	65	90	0,9	410	260	8,5
6	75	95	1,1	430	275	9,5
7	55	85	0,7	390	245	7,5
8	68	92	0,85	405	255	8,2
9	72	94	1,05	415	265	9,2
10	78	98	1,15	440	282	9,8

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) исходные данные
- 2) расчёт свойств
- 3) вычисление $\alpha, k, \Delta t_{\text{ср}}, Q$
- 4) сравнение площадей
- 5) вывод о влиянии загрязнений.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- выполнен точный расчёт;
- правильный учёт свойств.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- есть одна ошибка в интерполяции или арифметике;
- в письменном отчете по работе делает незначительные ошибки;

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;

- в ходе выполнения работы студент продемонстрировал слабые практические навыки, были допущены ошибки;

- в письменном отчете по работе допущены ошибки;

- ошибка в вычислении α или k .

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- грубые ошибки в уравнениях теплопередачи;

- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 1.5. Теплопередача

Практическое занятие №3 Расчет теплопередачи через ребристую стенку

Цель: научиться рассчитывать коэффициент теплопередачи оребренной трубы, оценивать эффективность оребрения.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19", проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Сравнить тепловой поток через гладкую трубу и оребренную. Определить коэффициент увеличения теплосъёма.

Теоретическая часть:

Расчет теплопередачи через ребристую стенку

3.1. Назначение оребрения

Оребрение применяется со стороны теплоносителя с малым коэффициентом теплоотдачи α (обычно со стороны газа). Оно увеличивает площадь поверхности теплообмена и интенсифицирует передачу теплоты.

3.2. Коэффициент оребрения

$$\varphi = \frac{F_{\text{реб}}}{F_{\text{гл}}} \quad (3.1)$$

где:

$F_{\text{реб}}$ – полная наружная поверхность ребристой трубы (рёбра + межрёберные участки), м^2 ;
 $F_{\text{гл}}$ – площадь наружной поверхности гладкой трубы той же длины, м^2 .

3.3. Эффективность ребра

Реальное ребро не является идеально теплопроводным, поэтому вводится понятие эффективности ребра η_r . Для прямоугольного ребра постоянного сечения:

$$\eta_r = \frac{th(m \cdot h)}{(m \cdot h)} \quad (3.2)$$

где:

$m = \sqrt{2 \cdot \frac{\alpha_{\text{нар}}}{(\lambda_{\text{реб}} \cdot \delta_r)}}$ – параметр ребра;

h – высота ребра, м ;

δ_r – толщина ребра, м ;

th – гиперболический тангенс.

Приближённые значения $th(x)$: при $x \rightarrow 0, th(x) \approx x$; при $x \rightarrow \infty, th(x) \rightarrow 1$.

3.4. Приведённый коэффициент теплоотдачи

С учётом оребрения и эффективности рёбер:

$$\alpha_{\text{прив}} = \alpha_{\text{нар}} \cdot [1 + (\varphi - 1) \cdot \eta_r] \quad (3.3)$$

3.5. Коэффициент теплопередачи для оребрённой трубы

Отнесённый к гладкой поверхности:

$$k_{\text{ор}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{прив}}} + \left(\frac{d_{\text{нар}}}{2\lambda_{\text{ст}}}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}\right) \cdot \left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right)} \quad (3.4)$$

3.6. Сравнение тепловых потоков

Тепловой поток через гладкую трубу:

$$Q_{\text{гл}} = k_{\text{гл}} \cdot F_{\text{гл}} \cdot \Delta t_{\text{ср}} \quad (3.5)$$

Тепловой поток через оребрённую трубу:

$$Q_{\text{ор}} = k_{\text{ор}} \cdot F_{\text{гл}} \cdot \Delta t_{\text{ср}} \quad (3.6)$$

Отношение $\frac{Q_{\text{ор}}}{Q_{\text{гл}}}$ показывает эффективность оребрения.

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитайте k для гладкой трубы

2. Вычислите $m = \sqrt{2 \cdot \frac{\alpha_{\text{нар}}}{\lambda_{\text{реб}} \cdot \delta_r}}$, эффективность ребра $\eta_r = \frac{th(m \cdot h)}{m \cdot h}$

3. Найдите $\alpha_{\text{прив}} = \alpha_{\text{нар}} \cdot [1 + (\varphi - 1) \cdot \eta_r]$ ($\varphi = 5$)

4. Рассчитайте $k_{\text{ор}}$

5. Сравните $Q_{\text{гл}}$ и $Q_{\text{ор}}$.

Таблица 3.1 Исходные данные

При ($d_{\text{нар}} = 25 \text{ мм}$, $d_{\text{вн}} = 21 \text{ мм}$, $\Delta t_{\text{ср}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $h = 10 \text{ мм}$, $\varphi = 5,0$)

Вариант	$\alpha_{\text{вн}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\alpha_{\text{нар}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
1	1500	25
2	2000	30
3	1200	20
4	1800	35
5	1600	28
6	2200	32
7	1400	22
8	2500	40
9	1700	27
10	1900	33

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

1) таблицу результатов ($k_{\text{гл}}, k_{\text{ор}}, Q_{\text{гл}}, Q_{\text{ор}}$, степень увеличения) и анализ.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- выполнен точный расчёт.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- есть незначительная ошибка в η_p .

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- в ходе выполнения работы студент продемонстрировал слабые практические навыки, были допущены ошибки;

- не учтена эффективность ребра.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- неверна базовая формула k ;

- лабораторная работа выполнена не полностью и объем выполненной работы не позволяет сделать правильных выводов, у студента имеются лишь отдельные представления об изученном материале, большая часть материала не усвоена;

- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 2.1 Классификация теплообменного оборудования

Практическое занятие №4 Расчет толщины тепловой изоляции

Цель: научиться определять критический диаметр изоляции, подбирать нормативную толщину по допустимой плотности теплового потока.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19”, проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Рассчитать требуемую толщину изоляции, проверить температуру поверхности на безопасность.

Теоретическая часть:

Расчет толщины тепловой изоляции

4.1. Критический диаметр изоляции

При нанесении тепловой изоляции на цилиндрическую поверхность (трубу) общее термическое сопротивление складывается из сопротивления изоляции и сопротивления теплоотдаче от наружной поверхности. Существует критический диаметр изоляции:

$$d_{кр} = 2 \cdot \frac{\lambda_{из}}{\alpha_{нар}} \quad (4.1)$$

где:

$\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

$\alpha_{нар}$ – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

Правило:

Если $d_{нар} \text{ трубы} > d_{кр}$ – любое увеличение толщины изоляции снижает теплотери.

Если $d_{нар} \text{ трубы} < d_{кр}$ – тонкий слой изоляции может увеличить теплотери.

4.2. Расчёт толщины изоляции по нормируемой плотности теплового потока

Для цилиндрической стенки (без учёта теплоотдачи) требуемый наружный диаметр изоляции:

$$d_{из} = d_{нар} \cdot \exp \left(2\pi \cdot \lambda_{из} \cdot \frac{(t_T - t_{oc})}{q_{ln}} \right) \quad (4.2)$$

где:

t_T – температура теплоносителя (трубы), °C;

t_{oc} – температура окружающей среды, °C;

q_{ln} – нормируемая линейная плотность теплового потока, $\frac{Вт}{м}$.

Толщина изоляции:

$$\delta_{из} = \frac{(d_{из} - d_{нар})}{2} \quad (4.3)$$

4.3. Проверка температуры поверхности изоляции

Для безопасности температура наружной поверхности изоляции не должна превышать 45 °C (для помещений). Проверка:

$$t_{пов} = t_{oc} + \frac{q_l}{(\pi \cdot d_{из} \cdot \alpha_{нар})} \quad (4.4)$$

где q_l – фактическая линейная плотность теплового потока при выбранной толщине.

Порядок выполнения работы:

1. Определите $d_{кр} = 2 \cdot \frac{\lambda_{из}}{\alpha_{нар}}$
2. Сравните с $d_{нар}$
3. Вычислите $d_{из} = d_{нар} \cdot \exp\left(2\pi \cdot \lambda_{из} \cdot \frac{(t_T - t_{ос})}{q_{лн}}\right)$ найдите $\delta_{из}$ и округлите до десятых
4. Проверьте $q_{лфакт}$ и $t_{пов}$
5. Сравните $t_{пов}$ с 45 °С.

Таблица 4.1 Исходные данные

При ($\alpha_{нар} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$)

Вариант	$d_{нар}, \text{мм}$	$t_T, ^\circ\text{C}$	$t_{ос}, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{из}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$q_{лн}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$
1	57	150	25	0,045	60
2	76	180	20	0,04	55
3	89	160	30	0,05	65
4	108	200	25	0,045	70
5	133	170	20	0,035	50
6	57	190	25	0,04	60
7	76	150	30	0,045	55
8	89	180	20	0,05	65
9	108	160	25	0,04	70
10	133	200	30	0,045	75

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) таблицу с критическим диаметром
- 2) требуемую толщину и проверочные величины
- 3) заключение о безопасности.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- выполнен точный расчёт.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- есть ошибка округления или неточность в экспоненте.
- в письменном отчете по работе делает незначительные ошибки;

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;
- в ходе выполнения работы студент продемонстрировал слабые практические навыки, были допущены ошибки;
- не учтён критический диаметр.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- неверно рассчитана толщина;
- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 2.1. Классификация тепломассообменного оборудования

Практическое занятие №5 Тепловой расчет рекуперативного теплообменника

Цель: выполнив работу, вы будете уметь составлять тепловой баланс, рассчитывать $\Delta t_{ср}$ и подбирать типовой аппарат.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 1 Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19", проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Определить требуемую поверхность теплообмена и подобрать трубный пучок.

Теоретическая часть:

Тепловой расчет рекуперативного теплообменника

5.1. Тепловой баланс

Для рекуперативного теплообменника (без учёта потерь теплоты в окружающую среду) справедливо уравнение теплового баланса:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2') \quad (5.1)$$

где:

G_1, G_2 – расходы греющего и нагреваемого теплоносителей, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

c_1, c_2 – удельные теплоёмкости, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ или $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

t_1', t_1'' – температуры греющего теплоносителя на входе и выходе, °С;

t_2', t_2'' – температуры нагреваемого теплоносителя на входе и выходе, °С.

5.2. Уравнение теплопередачи

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{cp}} \quad (5.2)$$

5.3. Средний температурный напор

Для противоточной схемы:

$$\Delta t_6 = t_1' - t_2'' \quad (5.3)$$

$$\Delta t_m = t_1'' - t_2' \quad (5.4)$$

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(\Delta t_6 - \Delta t_m)}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}\right)} \quad (5.5)$$

Если $\Delta t_6 = \Delta t_m$, то $\Delta t_{\text{cp}} = \Delta t_6 = \Delta t_m$ (используется среднеарифметическое).

5.4. Определение поверхности теплообмена

$$F_{\text{треб}} = \frac{Q}{(k \cdot \Delta t_{\text{ср}})}, [\text{М}^2] \quad (5.6)$$

По найденной поверхности подбирается типовой теплообменник: выбирается количество труб N и их длина L так, чтобы:

$$N \cdot \pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot L \geq F_{\text{треб}} \quad (5.7)$$

Рекомендуемая длина труб – от 1 до 6 м.

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитайте $Q = G_1 \cdot c \cdot (t'_1 - t''_1)$
2. Вычислите $\Delta t_{\text{ср}}$ как среднелогарифмическое
3. Найдите $F_{\text{треб}} = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{ср}}}$
4. Подберите N и $L_{\text{тр}}$ (реальная длина до 6 м).

Таблица 5.1 Исходные данные

При ($c_{\text{воды}} = 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, d_{\text{нар}} = 16 \text{ мм}$)*

Вариант	$t'_1, ^\circ\text{C}$	$t''_1, ^\circ\text{C}$	$G_1, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$t'_2, ^\circ\text{C}$	$t''_2, ^\circ\text{C}$	$G_2, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
1	130	90	2,0	60	80	2,5	800
2	120	85	1,8	50	75	2,0	750
3	140	95	2,2	65	85	2,8	850
4	125	88	1,9	55	78	2,2	780
5	135	92	2,1	62	82	2,6	820
6	128	90	2,0	58	80	2,4	790
7	132	88	2,3	60	82	2,7	810
8	138	94	2,4	63	86	3,0	840
9	122	86	1,7	52	74	1,9	740
10	145	98	2,5	68	88	3,2	860

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) Расчет теплового баланса
- 2) $\Delta t_{\text{ср}}, F_{\text{треб}}$
- 3) подбор геометрии
- 4) схему потоков.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- выполнен точный расчет, верно подобран пучок.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- в письменном отчете по работе делает незначительные ошибки;

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;
- в ходе выполнения работы студент продемонстрировал слабые практические навыки, были допущены ошибки в $\Delta t_{\text{ср}}$.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- неверен тепловой баланс;
- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 2.2. Поверхности нагрева котла

Практическое занятие №6 Тепловой расчет пароперегревателя

Цель: научиться выполнять поверочный расчёт конвективного пароперегревателя, определять температуру стенки.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 1 Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19", проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Проверить выполнение уравнения теплопередачи, оценить температуру стенки, предложить способ регулирования.

Теоретическая часть:

Тепловой расчет пароперегревателя

6.1. Назначение пароперегревателя

Пароперегреватель – поверхность нагрева котла, в которой насыщенный пар перегревается до заданной температуры. Теплота передаётся от дымовых газов к пару через стенки труб.

6.2. Тепловой баланс пароперегревателя

$$Q = D \cdot (h_{п.вых} - h_{п.вх}) = G_{газ} \cdot c_{ргаз} \cdot (\theta_{вх} - \theta_{вых}) \quad (6.1)$$

где:

D – расход пара, $\frac{кг}{с}$;

$h_{пвх}, h_{пвых}$ – энтальпия пара на входе и выходе, $\frac{кДж}{кг}$;

$G_{газ}$ – расход газов, $\frac{кг}{с}$;

$c_{ргаз}$ – удельная теплоёмкость газов, $\frac{кДж}{кг \cdot K}$;

$\theta_{вх}, \theta_{вых}$ – температуры газов на входе и выходе, °C.

6.3. Энтальпия перегретого пара

Таблица 6.1 Энтальпия насыщенного пара (при $p \approx 1,4$ МПа): $h_{\text{насыщ}} \approx 2790 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

$t, ^\circ\text{C}$	250	300	350	400
$h, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	2920	3050	3170	3280

6.4. Уравнение теплопередачи

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}} \quad (6.2)$$

Схема движения – противоток: $\Delta t_0 = \theta_{\text{вх}} - t_{\text{пвых}}, \Delta t_{\text{м}} = \theta_{\text{вых}} - t_{\text{пвх}}$

6.5. Температура стенки трубы

Для оценки термической прочности металла:

$$q = \frac{Q}{F} - \text{плотность теплового потока, } \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Температура наружной стенки трубы со стороны газов:

$$t_{\text{стнар}} = \theta_{\text{ср}} - \frac{q}{\alpha_{\text{газ}}} \quad (6.3)$$

где:

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_{\text{вх}} + \theta_{\text{вых}}}{2}, \alpha_{\text{газ}} \approx 80 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Допустимая температура для углеродистой стали – не более 500 °С.

Порядок выполнения работы:

1. Определите $h_{\text{вых}}$ по таблице, рассчитайте $Q_{\text{пар}} = D \cdot (h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}})$
2. Найдите $G_{\text{газ}}$ из баланса
3. Вычислите $\Delta t_{\text{ср}}$ и $Q_{\text{расч}} = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}}$
4. Сравните их
5. Определите $t_{\text{стнар}} = \theta_{\text{ср}} - \frac{q}{\alpha_{\text{газ}}}$. Сравните с 500 °С.

Таблица 6.2 Исходные данные

При ($h_{\text{вх}} = 2790 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, c_{\text{ргаз}} = 1,15 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$)

Вариант	$D, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$t_{\text{пвых}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	F, м ²	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
1	5	380	900	650	120	60
2	4	400	950	700	100	55
3	6	360	880	620	140	65
4	5,5	390	920	670	130	58
5	4,5	370	910	640	110	62
6	5,2	385	930	680	125	60
7	4,8	375	890	630	115	63
8	6,2	395	940	690	135	57
9	4,2	365	870	610	105	64
10	5,8	400	960	710	145	59

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) расчёт
- 2) сравнительную таблицу
- 3) вывод о допустимости стали и предложение по регулированию.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- выполнен точный баланс, верный анализ стенки.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- есть незначительная ошибка в энтальпии.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;
- анализ температуры стенки отсутствует.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- не выполнен баланс.
- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 2.2. Поверхности нагрева котла

Практическое занятие №7 Тепловой расчет водяного экономайзера

Цель: научиться рассчитывать тепловосприятие экономайзера, определять температуру уходящих газов и оценивать опасность низкотемпературной коррозии.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 1 Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19", проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Рассчитать тепловосприятие, проверить поверхность нагрева, оценить риск коррозии.

Теоретическая часть:

Тепловой расчет водяного экономайзера

7.1. Назначение экономайзера

Водяной экономайзер – поверхность нагрева, в которой питательная вода подогревается дымовыми газами перед подачей в барабан котла. Это повышает экономичность котельной установки.

7.2. Тепловой баланс

$$Q = G_B \cdot c_B \cdot (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}}) = G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (\theta_{\text{ВХ}} - \theta_{\text{ВЫХ}}) \quad (7.1)$$

7.3. Уравнение теплопередачи

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}} \quad (7.2)$$

Схема – противоток:

$$\Delta t_6 = \theta_{\text{ВХ}} - t_{\text{ВВЫХ}} \quad (7.3)$$

$$\Delta t_M = \theta_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВВХ}} \quad (7.4)$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(\Delta t_6 - \Delta t_M)}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}\right)} \quad (7.5)$$

7.4. Оценка низкотемпературной коррозии

При сжигании природного газа в продуктах сгорания содержится водяной пар. При температуре стенки ниже точки росы ($t_{\text{т.р}} \approx 110^\circ\text{C}$) происходит конденсация кислот, вызывающая коррозию.

Температура стенки на холодном конце экономайзера:

$$t_{\text{ст.хол}} = t_{\text{ВХ}} + \frac{q}{\alpha_{\text{ВН}}} \quad (7.6)$$

где:

$q = \frac{Q}{F}$ – плотность теплового потока, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

$\alpha_{\text{ВН}} \approx 3000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к воде.

Условие отсутствия коррозии: $t_{\text{ст.хол}} > 110^\circ\text{C}$.

Если условие не выполняется, применяют рециркуляцию горячей воды на вход экономайзера.

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитайте $Q = G_B \cdot c_B \cdot (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})$
2. Найдите $G_{\text{газ}} = \frac{Q}{(c_{\text{газ}} \cdot (\theta_{\text{ВХ}} - \theta_{\text{ВЫХ}}))}$
3. Вычислите $\Delta t_{\text{ср}}$ и $Q_{\text{передачи}} = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}}$
4. Определите $t_{\text{ст.хол}} = t_{\text{В.ВХ}} + \frac{q}{3000}$
5. Сравните с $t_{\text{т}} = 110^\circ\text{C}$.

Таблица 7.1 Исходные данные

При ($c_B = 4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $c_{\text{газ}} = 1,08 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$)

Вариант	$G_B, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$t_{\text{В.ВХ}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{В.ВЫХ}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{ВХ}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{ВЫХ}}, ^\circ\text{C}$	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	F, м ²
1	4,0	105	150	350	200	50	80
2	3,5	100	145	340	190	48	75
3	4,5	110	155	360	210	52	85
4	5,0	102	148	345	195	50	90
5	3,8	108	152	355	205	55	82
6	4,2	104	146	348	198	49	78
7	4,8	106	150	352	202	53	88
8	3,2	112	158	365	215	56	72
9	5,2	103	147	342	192	47	92
10	4,6	107	153	358	208	51	84

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) баланс
- 2) расчёт $\Delta t_{\text{ср}}$

3) сравнение Q

4) анализ коррозии и рекомендации по её устранению.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- выполнен точный расчёт, правильно определен $t_{ст}$.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- анализ коррозии неполный;
- в письменном отчете по работе делает незначительные ошибки;

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;
- не проверена температура стенки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- грубые ошибки баланса;
- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 2.2. Поверхности нагрева котла

Практическое занятие №8 Тепловой расчет рекуперативного воздухоподогревателя

Цель работы: научиться рассчитывать трубчатый воздухоподогреватель, оценивать температуру стенки и определять долю рециркуляции.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 1 Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Компьютер: Intel (R) Core (TM) i5- 2300 CPU@ 2, 80 GHz 3 GHz/RAM/8, 00 Gb /HDD/244 Gb keyb/ монитор19", проектор Acer X 1261 P; экран настенный: программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно, 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Задание:

Проверить тепловой баланс, оценить риск коррозии, при необходимости рассчитать долю рециркуляции.

Теоретическая часть:

Тепловой расчет рекуперативного воздухоподогревателя

8.1. Назначение воздухоподогревателя

Воздухоподогреватель – поверхность нагрева, в которой воздух, необходимый для горения топлива, подогревается дымовыми газами. Это интенсифицирует процесс горения и повышает КПД котла.

8.2. Тепловой баланс

$$Q = G_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = G_{\text{газ}} \cdot c_{\text{газ}} \cdot (\theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{вых}}) \quad (8.1)$$

8.3. Уравнение теплопередачи

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}} \quad (8.2)$$

Для перекрёстного тока (трубчатый воздухоподогреватель) допускается расчёт как для противотока с поправочным коэффициентом $\approx 0,95$.

8.4. Температура стенки и коррозия

На холодном конце воздухоподогревателя (вход воздуха, выход газов) возможна низкотемпературная коррозия. Температура стенки:

$$T_{\text{ст}} = \frac{(\alpha_{\text{возд}} \cdot t_{\text{в.ВХ}} + \alpha_{\text{газ}} \cdot \theta_{\text{вых}})}{(\alpha_{\text{возд}} + \alpha_{\text{газ}})} \quad (8.3)$$

$$\text{или } t_{\text{ст}} = \theta_{\text{вых}} - \frac{q}{\alpha_{\text{газ}}}$$

$$\text{где } \alpha_{\text{возд}} \approx 40 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \alpha_{\text{газ}} \approx 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Точка росы: $t_p \approx 115^\circ\text{C}$ (для природного газа). Условие: $t_{\text{ст}} \geq 115^\circ\text{C}$.

8.5. Рециркуляция горячего воздуха

Если $t_{\text{ст}} < 115^\circ\text{C}$, необходимо повысить температуру воздуха на входе. Требуемая температура:

$$t_{\text{в.ВХ}}_{\text{треб}} = \frac{(115 \cdot (\alpha_{\text{возд}} + \alpha_{\text{газ}}) - \alpha_{\text{газ}} \cdot \theta_{\text{вых}})}{\alpha_{\text{возд}}} \quad (8.3)$$

Доля рециркуляции (возврат части горячего воздуха на вход):

$$r = \frac{(t_{\text{в.ВХ}}_{\text{треб}} - t_{\text{в.ВХ}})}{(t_{\text{в.ВЫХ}} - t_{\text{в.ВХ}})} \quad (8.4)$$

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитайте $Q = G_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})$

2. Найдите $G_{\text{газ}} = \frac{Q}{(c_{\text{газ}} \cdot (\theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{вых}}))}$

3. Вычислите $\Delta t_{\text{ср}}$, проверьте $Q_{\text{передачи}}$

4. Определите $t_{\text{ст}} = \theta_{\text{вых}} - \frac{q}{\alpha_{\text{газ}}}$

5. Сравните с $t_p = 115^\circ\text{C}$.

6. При необходимости найдите $t_{\text{в.ВХ}}_{\text{треб}}$ и долю рециркуляции r .

Таблица 8.1 Исходные данные

При ($c_{\text{возд}} = 1,005$, $c_{\text{газ}} = 1,09 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $\alpha_{\text{газ}} = 50$, $\alpha_{\text{возд}} = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$)

Вариант	$G_{\text{возд}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$t_{\text{в. ВХ}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{в. ВЫХ}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{ВХ}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{ВЫХ}}, ^\circ\text{C}$	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	F, м ²
1	10	30	250	350	160	25	200
2	12	25	240	340	150	24	220
3	8	35	260	360	170	26	180
4	15	20	230	330	140	23	250
5	11	28	245	345	155	25	210

6	9	32	255	355	165	27	190
7	14	22	235	335	145	24	240
8	13	27	240	340	150	25	230
9	10,5	30	248	348	158	26	205
10	11,5	24	238	338	148	24	225

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) подробный расчёт
- 2) анализ температуры стенки
- 3) расчёт рециркуляции.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если:

- выполнен точный расчёт, верно определены $t_{ст}$ и доли рециркуляции.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- есть неточность в вычислении $t_{ст}$, но логика верна;
- в письменном отчете по работе делает незначительные ошибки;

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;
- в ходе выполнения работы студент продемонстрировал слабые практические навыки, были допущены ошибки;
- рециркуляция не рассчитана.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- не выполнен тепловой баланс.
- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 2.1 Классификация тепломассообменного оборудования

Лабораторная работа №1 Исследование теплопередачи в рекуперативных водоподогревателях тепловых пунктов

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента теплопередачи рекуперативного водоподогревателя (теплообменника) в составе учебного стенда «Тепловой пункт», анализ влияния расхода теплоносителей на эффективность теплопередачи.

Выполнив работу, вы будете уметь:

Уд 1 Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Ноутбук: Lenovo 15.6", AMD A4 9120 2.2ГГц, 2-ядерный, /RAM 4ГБ DDR4, /HDD 500ГБ, программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно; 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно. Лабораторная установка "Автоматизированный тепловой пункт" АТП-01.

Теоретическая часть:

В автоматизированных тепловых пунктах (ИТП, ЦТП) для нагрева воды систем отопления и горячего водоснабжения широко применяются рекуперативные водоподогреватели – пластинчатые или кожухотрубные теплообменники, в которых теплота от греющего теплоносителя (сетевой воды) передаётся нагреваемому (воде системы отопления или ГВС) через разделительную стенку.

Основной характеристикой процесса теплопередачи является коэффициент теплопередачи k , который показывает, какое количество теплоты передаётся через единицу площади поверхности теплообмена за единицу времени при разности температур в 1°C . Он определяется по формуле:

$$k = \frac{Q}{(F \cdot dt_{sr})} \quad (1.1)$$

где:

Q – тепловая мощность аппарата (количество теплоты, передаваемое в единицу времени), Вт;

F – площадь поверхности теплообмена, м^2 (для учебного стенда – величина известная, указана в паспорте установки, принимается $F = 0,8 \text{ м}^2$);

dt_{sr} – среднелогарифмический температурный напор между теплоносителями, $^\circ\text{C}$.

Тепловую мощность Q можно определить из уравнения теплового баланса. Пренебрегая потерями теплоты в окружающую среду, количество теплоты, отданное греющим теплоносителем, равно количеству теплоты, полученному нагреваемым:

$$Q = Q_1 = Q_2 \quad (1.2)$$

$$Q_1 = G_1 \cdot c_p \cdot (t_{1vh} - t_{1vyh}) \quad (1.3)$$

$$Q_2 = G_2 \cdot c_p \cdot (t_{2vyh} - t_{2vh}) \quad (1.4)$$

где:

Q_1 – тепловая мощность по греющей воде, Вт;

Q_2 – тепловая мощность по нагреваемой воде, Вт;

G_1, G_2 – массовые расходы греющей и нагреваемой воды соответственно, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

c_p – удельная теплоёмкость воды ($c_p = 4187 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$);

t_{1vh}, t_{1vyh} – температуры греющей воды на входе в теплообменник и выходе из него, $^\circ\text{C}$;

t_{2vh}, t_{2vyh} – температуры нагреваемой воды на входе в теплообменник и выходе из него, $^\circ\text{C}$.

Среднелогарифмический температурный напор для противоточной схемы (в стенде – противоточная) вычисляется по формуле:

$$dt_{sr} = \frac{(dt_b - dt_m)}{\ln\left(\frac{dt_b}{dt_m}\right)} \quad (1.5)$$

где:

$$dt_b = t_{1vh} - t_{2vyh} \quad (1.6)$$

$$dt_m = t_{1vyh} - t_{2vh} \quad (1.7)$$

В учебной установке «Тепловой пункт» роль рекуперативного водоподогревателя выполняет теплообменник модуля отопления (на мнемосхеме – поз. Т2). Измеряемые параметры:

- t_{1vh} – температура греющей воды на входе в теплообменник (датчик Т1 модуля тепловой сети);
- t_{1vyh} – температура греющей воды на выходе из теплообменника (датчик Т2 модуля тепловой сети);
- t_{2vh} – температура нагреваемой воды на входе в теплообменник (обратка системы отопления, датчик Т6 модуля отопления);
- t_{2vyh} – температура нагреваемой воды на выходе из теплообменника (подача системы отопления, датчик Т5 модуля отопления);
- G_1 – расход греющей воды (расходомер F2 контура котла);
- G_2 – расход нагреваемой воды (расходомер F4 контура отопления).

Массовый расход G ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$) вычисляется по объёмному расходу Q_v ($\frac{\text{л}}{\text{ч}}$) с учётом плотности воды $1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$:

$$G = \frac{Q_v}{3600} \text{ (при } Q_v \text{ в } \frac{\text{л}}{\text{ч}}, \text{ так как } 1 \frac{\text{л}}{\text{ч}} = 0,001 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \text{ а } 1 \text{ м}^3 \text{ воды} = 1000 \text{ кг;}$$

$$\text{упрощённо: } G = \frac{Q_v}{3600} \text{).}$$

Задание: определить коэффициент теплопередачи рекуперативного водоподогревателя (теплообменника) в составе учебного стенда «Тепловой пункт» и проанализировать влияния расхода теплоносителей на эффективность теплопередачи.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с краткой теорией и описанием стенда (разделы «Описание стенда», мнемосхемы на вкладках 3 и 4 специализированного программного обеспечения).

2. Подготовить стенд к работе согласно разделу «Порядок подготовки и запуска стенда в работу» (заполнить бак водой, удалить воздух, включить питание, запустить СПО).

3. Запустить систему в режиме «Зима»:

- На вкладке 1 (или на лицевой панели) переключатель «лето-зима» установить в положение «зима».

- На вкладке 4 (модуль отопления) выбрать основной насос (например, Н-3.1) и перевести его в автоматический режим. Клапан V-3.1 откроется автоматически.

- На вкладке 3 (модуль тепловой сети) включить насос Н-2. Задать уставку ПИД-регулятора Т1-К1, например, 75°C , и перевести регулятор в автоматический режим. Дождаться выхода на режим.

4. Установить режим теплообменника:

- На вкладке 4 установить ПИД-регулятор Т5-V-1 в автоматический режим, задав уставку температуры подачи отопления $t_{2vyh} = 60^\circ\text{C}$ (или согласно указанию преподавателя). Коэффициенты П, И, Д оставить по умолчанию.

- С помощью бегунков на мнемосхеме модуля отопления установить мощность насосов Н-3.1 (или Н-3.2) на 50–70% от максимума.

5. Произвести измерения в установившемся режиме (через 10–15 минут работы системы). Записать показания датчиков в таблицу 1.1 для первого режима:

- t_{1vh} (Т1)

- t_{1vyh} (Т2)

- t_{2vh} (Т6)

- t_{2vyh} (Т5)

- расход греющей воды $Q_{v1} \left(F_2, \frac{\text{л}}{\text{ч}} \right)$

- расход нагреваемой воды $Q_{v2} \left(F_4, \frac{\text{л}}{\text{ч}} \right)$

6. Изменить режим работы (см. таблицу 1, режимы 2, 3, 4):

Таблица 1.1 Измеренные параметры

Режим	$t_{1vh}, ^\circ C$	$t_{1vyh}, ^\circ C$	$t_{2vh}, ^\circ C$	$t_{2vyh}, ^\circ C$	$Q_{v1}, \frac{л}{ч}$	$Q_{v2}, \frac{л}{ч}$
1						
2						
3						
4						

- Режим 2: увеличить уставку температуры котла до 85 °С (или изменить уставку Т5 до 65 °С).

- Режим 3: изменить мощность насоса НЗ (увеличить до 100%) при неизменных температурах уставок.

- Режим 4: изменить мощность насоса Н2 (контур котла) – например, снизить до 50%.

Каждый раз дожидаться установления стационарного режима (5–7 минут) и записывать показания.

7. По окончании измерений остановить стенд согласно инструкции (выключить насосы, регуляторы, питание).

Ход работы:

Для каждого режима (1–4) выполнить следующие расчёты.

1. Перевести объёмные расходы в массовые:

$$G_1 = \frac{Q_{v1}}{3600} \left(\frac{кг}{с} \right) \quad (1.8)$$

$$G_2 = \frac{Q_{v2}}{3600} \left(\frac{кг}{с} \right) \quad (1.9)$$

2. Рассчитать тепловую мощность по греющей воде (Q_1) и по нагреваемой воде (Q_2) по формулам (2) и (3). Определить среднюю мощность $Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$ (расхождение не должно превышать 10–15%).

3. Вычислить для каждого режима:

- разности температур:

$$dt_b = t_{1vh} - t_{2vyh} \quad (1.10)$$

$$dt_m = t_{1vyh} - t_{2vh} \quad (1.11)$$

- среднелогарифмический напор:

$$dt_{sr} = \frac{(dt_b - dt_m)}{\ln\left(\frac{dt_b}{dt_m}\right)} \quad (1.12)$$

- коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{Q}{(F * dt_{sr})} \quad (1.13)$$

принимая $F = 0,8 \text{ м}^2$.

4. Результаты занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Рассчитанные величины

Режим	$G_1, \frac{кг}{с}$	$G_2, \frac{кг}{с}$	$Q_1, \text{Вт}$	$Q_2, \text{Вт}$	$Q, \text{Вт}$	$dt_b, ^\circ C$	$dt_m, ^\circ C$	$dt_{sr}, ^\circ C$	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ C}$
1									
2									
3									
4									

5. Построить график зависимости коэффициента теплопередачи k от расхода нагреваемой воды G_2 (или от режима). Сделать выводы о влиянии расходов и температур на интенсивность теплопередачи.

На основе полученных результатов: указать диапазон значений коэффициента теплопередачи, оценить влияние изменения расходов на эффективность работы водоподогревателя, сопоставить экспериментальные данные с теоретическими ожиданиями.

Контрольные вопросы и задания:

1. Что такое рекуперативный теплообменник? В чём его отличие от регенеративного?
2. Запишите уравнение теплопередачи через плоскую стенку и поясните физический смысл коэффициента теплопередачи.
3. Почему для расчёта dt_{sr} используется среднее логарифмическое, а не среднеарифметическое значение?
4. Как изменится коэффициент теплопередачи, если увеличить скорость движения воды в каналах теплообменника? Почему?
5. Сравните значения Q_1 и Q_2 в каждом опыте. Объясните возможные расхождения.
6. Какие факторы ограничивают рост k при повышении расходов теплоносителей?

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) наименование работы и цель работы;
- 2) схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;
- 3) результаты расчетов;
- 4) выводы по работе.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если студент:

- свободно применяет полученные знания при выполнении лабораторных заданий;
- выполнил работу в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности действий;
- в письменном отчете по работе правильно и аккуратно выполнены все записи.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- выполнены требования к оценке «отлично», но допущены 2 – 3 недочета при выполнении лабораторных заданий и студент может их исправить самостоятельно или при небольшой помощи преподавателя;
- в письменном отчете по работе делает незначительные ошибки.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;
- в ходе выполнения работы студент продемонстрировал слабые практические навыки, были допущены ошибки;
- в письменном отчете по работе допущены ошибки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- лабораторная работа выполнена не полностью и объем выполненной работы не позволяет сделать правильных выводов, у студента имеются лишь отдельные представления об изученном материале, большая часть материала не усвоена;
- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.

Тема 2.1 Классификация тепломассообменного оборудования

Лабораторная работа №2 Исследование теплопередачи отопительных приборов

Цель работы: экспериментальное определение тепловой мощности и коэффициента теплопередачи отопительного прибора (радиатора) в составе учебного стенда «Тепловой

пункт»; анализ влияния расхода теплоносителя и температурного режима на эффективность теплоотдачи.

Выполнив работу, Вы будете уметь:

Уд 1 Осуществлять пуск и остановку теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уд 2 Управлять режимами работы теплотехнического оборудования и систем тепло- и топливоснабжения;

Уо 01.01 распознавать и анализировать задачу и/или проблему в профессиональном и/или социальном контексте; выделять её составные части; определять этапы решения задачи; составлять план действий; определять необходимые ресурсы; реализовывать составленный план;

Уо 01.02 владеть актуальными методами работы в профессиональной и смежных сферах;

Уо 02.01 определять необходимые источники информации; эффективно искать информацию, необходимую для решения задачи и/или проблемы, оформлять результаты поиска;

Уо 02.02 использовать современное программное обеспечение, различные цифровые средства для решения профессиональных задач; проявлять культуру информационной безопасности при использовании информационно-коммуникационных технологий.

Материальное обеспечение:

Ноутбук: Lenovo 15.6", AMD A4 9120 2.2ГГц, 2-ядерный, /RAM 4ГБ DDR4, /HDD 500ГБ, программное обеспечение: MS Windows 7, лицензия №47818300, бессрочно; MS Office 2007, лицензия 42373644, бессрочно; Adobe Reader 9 свободно распространяемое ПО бессрочно; 7 Zip свободно распространяемое ПО бессрочно.

Лабораторная установка "Автоматизированный тепловой пункт" АТП-01.

Теоретическая часть:

Отопительные приборы (радиаторы, конвекторы, регистры) являются конечными элементами системы отопления, передающими теплоту от теплоносителя в помещение. Процесс теплопередачи складывается из трёх этапов:

- 1) передача теплоты от теплоносителя к внутренней поверхности прибора (конвекция);
- 2) теплопроводность через стенку прибора;
- 3) передача теплоты от наружной поверхности прибора к воздуху помещения (конвекция и излучение).

Основной характеристикой, оценивающей эффективность прибора, является коэффициент теплопередачи $k_{pr} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$. Он показывает, какое количество теплоты передаётся через 1 м² площади поверхности прибора за 1 секунду при разности температур между теплоносителем и воздухом в 1 °С.

Тепловой поток (тепловая мощность) отопительного прибора может быть определён двумя способами.

- 1) Из уравнения теплового баланса теплоносителя (количество теплоты, отданное водой, проходящей через прибор):

$$Q_{pr} = G \cdot c_p \cdot (t_{vh} - t_{vyh}) \quad (2.1)$$

где:

Q_{pr} – тепловая мощность прибора, Вт;

G – массовый расход теплоносителя через прибор, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

c_p – удельная теплоёмкость воды ($c_p = 4187 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$);

t_{vh} – температура воды на входе в прибор, °С;

t_{vyh} – температура воды на выходе из прибора, °С.

2) Из уравнения теплопередачи через поверхность прибора:

$$Q_{pr} = k_{pr} \cdot F_{pr} \cdot (t_{sr} - t_v) \quad (2.2)$$

где:

k_{pr} – коэффициент теплопередачи прибора, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

F_{pr} – площадь поверхности нагрева прибора (в учебном стенде – известная величина), м^2 ;

t_{sr} – средняя температура теплоносителя в приборе, $^\circ\text{C}$;

t_v – температура воздуха в помещении, $^\circ\text{C}$ (принимается $t_v = 20^\circ\text{C}$).

Средняя температура теплоносителя в приборе определяется как среднеарифметическое температур на входе и выходе (при небольших перепадах температур):

$$t_{sr} = \frac{(t_{vh} + t_{vyh})}{2} \quad (2.3)$$

Из (2) можно выразить экспериментальное значение коэффициента теплопередачи:

$$k_{pr} = \frac{Q_{pr}}{(F_{pr} \cdot (t_{sr} - t_v))} \quad (2.4)$$

В учебной установке «Тепловой пункт» роль отопительного прибора выполняет радиатор, установленный в модуле отопления (на мнемосхеме – позиция «Отопительный прибор»). Измеряемые параметры:

- t_{vh} – температура подающей линии системы отопления (датчик Т5 модуля отопления);
- t_{vyh} – температура обратной линии системы отопления (датчик Т6 модуля отопления);
- G – расход теплоносителя через отопительный прибор (расходомер F4 контура отопления).

Массовый расход $G \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$ пересчитывается из объёмного расхода $Q_v \left(\frac{\text{л}}{\text{ч}} \right)$, показываемого расходомером F4, по формуле:

$$G = \frac{Q_v}{3600} \quad (2.5)$$

(поскольку 1 л воды = 1 кг, а 1 час = 3600 секунд).

Площадь поверхности нагрева радиатора F_{pr} для учебного стенда указана в паспорте установки (принимается $F_{pr} = 1,2 \text{ м}^2$).

Задание:

В составе учебного стенда «Тепловой пункт» проанализировать влияния расхода теплоносителя и температурного режима на эффективность теплоотдачи.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с краткой теорией и описанием стенда (разделы «Описание стенда», мнемосхема на вкладке 4 специализированного программного обеспечения).

2. Подготовить стенд к работе согласно разделу «Порядок подготовки и запуска стенда в работу» (заполнить бак водой, удалить воздух, включить питание, запустить СПО). Убедиться, что система заполнена, давление в контуре отопления около 1,5 бар.

3. Запустить систему в режиме «Зима»:

- На вкладке 1 или на лицевой панели переключатель «лето-зима» установить в положение «зима».

- На вкладке 4 (модуль отопления) выбрать основной насос (например, Н-3.1) и перевести его в автоматический режим (клапан V-3.1 откроется автоматически). Задать начальную мощность насоса с помощью бегунка (например, 50% от максимума).

- На вкладке 3 (модуль тепловой сети) включить насос Н-2. Задать уставку ПИД-регулятора Т1-К1 (температура греющей воды) равной, например, 80°C , и перевести регулятор в автоматический режим.

4. Настроить регулятор отопления:

- На вкладке 4 включить ПИД-регулятор Т5-V-1 в автоматический режим. Для режима 1 задать уставку температуры подачи (температура на входе в отопительный прибор t_{vh}) равной

55 °С (или согласно указанию преподавателя). Дождаться установления стационарного режима (10–15 минут).

5. Провести измерения для пяти различных режимов (согласно таблице 2.1). В каждом режиме после выхода на стационарное состояние (не менее 5 минут без колебаний) записать в таблицу 2.1:

- t_{vh} (Т5, °С)
- t_{vyh} (Т6, °С)
- объёмный расход Q_v ($F4, \frac{\text{л}}{\text{ч}}$)

Таблица 2.1 Измеренные параметры

Режим	Уставка t_{vh} , °С	Мощность насоса, %	t_{vh} (Т5), °С	t_{vyh} (Т6), °С	Q_v (F4), $\frac{\text{л}}{\text{ч}}$
1	55	50			
2	65	50			
3	75	50			
4	65	80-100			
5	65	30			

6. Изменение режимов:

- Режим 2: увеличить уставку ПИД-регулятора Т5-V-1 до 65 °С (оставить расход насоса прежним).
- Режим 3: увеличить уставку до 75 °С.
- Режим 4: вернуть уставку 65 °С, но увеличить мощность насоса Н-3.1 до 80–100% (изменение расхода).
- Режим 5: при уставке 65 °С уменьшить мощность насоса до 30% (или выбрать резервный насос Н-3.2 на пониженной частоте). Для каждого режима дождаться стабилизации.

7. По окончании измерений остановить стенд: выключить регуляторы, насосы, отключить питание и закрыть вентили.

Ход работы:

Для каждого режима (1–5) выполнить следующие расчёты.

1. Перевести объёмный расход в массовый по формуле (5): $G = \frac{Q_v}{3600} \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$.

2. Рассчитать тепловую мощность отопительного прибора по формуле (1):

$$Q_{pr} = G \cdot 4187 \cdot (t_{vh} - t_{vyh}) \quad (2.6)$$

3. Определить среднюю температуру теплоносителя в приборе по формуле (3):

$$t_{sr} = \frac{(t_{vh} + t_{vyh})}{2} \quad (2.7)$$

4. Вычислить температурный напор между теплоносителем и воздухом: $dt = t_{sr} - t_v$, принимая $t_v = 20$ °С.

5. Рассчитать коэффициент теплопередачи прибора по формуле (4), принимая $F_{pr} = 1,2$ м²:

$$k_{pr} = \frac{Q_{pr}}{(1,2 \cdot dt)} \quad (2.8)$$

6. Результаты занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Рассчитанные величины

Режим	$G, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	Q_{pr} , Вт	t_{sr} , °С	$dt = t_{sr} - 20$, °С	$k_{pr}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$
1					
2					
3					
4					
5					

7. Построить графики зависимости:

- тепловой мощности Q_{pr} от расхода теплоносителя G (для одинаковой уставки – режимы 2,4,5);

- коэффициента теплопередачи k_{pr} от температурного напора dt (для всех режимов).

На основе полученных данных: указать диапазон изменения коэффициента теплопередачи, оценить, при каком режиме (высокой или низкой температуре, большом или малом расходе) прибор работает эффективнее с точки зрения теплоотдачи на единицу площади; объяснить полученные зависимости, сопоставить с теоретическими закономерностями.

Контрольные вопросы и задания:

1. Объясните физический смысл коэффициента теплопередачи отопительного прибора. От каких факторов он зависит?

2. Почему при увеличении расхода теплоносителя через прибор (при неизменной температуре на входе) тепловая мощность возрастает, но не прямо пропорционально?

3. Как влияет повышение температуры подачи на коэффициент теплопередачи k_{pr} ? Сравните режимы 1, 2, 3.

4. В каких единицах измеряется тепловая мощность прибора? Переведите полученные значения в килокалории в час ($1 \text{ Вт} = 0,86 \frac{\text{ккал}}{\text{ч}}$).

5. Сравните значения k_{pr} , полученные в режимах 2, 4, 5. Сделайте вывод о влиянии скорости движения воды в приборе на интенсивность теплоотдачи.

6. Какие допущения были приняты при расчёте (постоянство $F_{pr}, t_v = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)? Как они могли повлиять на точность результатов?

Форма представления результата:

Работа должна быть представлена в виде отчета, включающего в себя:

- 1) наименование работы и цель работы;
- 2) схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;
- 3) результаты расчетов;
- 4) выводы по работе.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется, если студент:

- свободно применяет полученные знания при выполнении лабораторных заданий;
- выполнил работу в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности действий;
- в письменном отчете по работе правильно и аккуратно выполнены все записи.

Оценка «хорошо» выставляется, если:

- выполнены требования к оценке «отлично», но допущены 2 – 3 недочета при выполнении лабораторных заданий и студент может их исправить самостоятельно или при небольшой помощи преподавателя.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если:

- практическая работа выполнена не полностью, но объем выполненной части позволяет получить правильные результаты и выводы;
- в ходе выполнения работы студент продемонстрировал слабые практические навыки, были допущены ошибки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если:

- лабораторная работа выполнена не полностью и объем выполненной работы не позволяет сделать правильных выводов, у студента имеются лишь отдельные представления об изученном материале, большая часть материала не усвоена;
- в письменном отчете по работе допущены грубые ошибки, либо он вообще отсутствует.