

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Фурсов Владимир Александрович

Должность: И.о. директора Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского

федерального университета

Дата подписания: 05.06.2026 10:55:05

Уникальный программный ключ:

1c378726a41fd0143ae5bccc8ba818c0b0b0aa62

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «ТЕПЛОТЕХНИКА»

для студентов направления подготовки

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Пятигорск 2026 г.

Содержание

Тема лабораторной работы 1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР **Ошибка! Закладка не определена.**

Тема лабораторной работы 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА.**Ошибка! Закладка не определена.**

Тема лабораторной работы 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.....**Ошибка! Закладка не определена.**

Тема лабораторной работы 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА**Ошибка! Закладка не определена.**

Тема лабораторной работы 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Тема лабораторной работы 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА.....**Ошибка! Закладка не определена.**

Тема лабораторной работы 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ.**Ошибка! Закладка не определена.**

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ.

Работа в лаборатории неизбежно связана с целым рядом вредных и опасных факторов. Студент допускается к практической работе после прохождения инструктажа и собеседования, касающегося вопросов техники безопасности. Если студент выполняет новые виды работ, то проводят внеплановый инструктаж. Студент обязан пользоваться средствами индивидуальной защиты и спецодеждой. Каждый студент четко выполняет требования преподавателя, который отвечает за соблюдение правил и ведет журнал отчетности. Еще надо отметить, что повторные инструктажи обязательно проводятся дважды в год, а также при каких-то изменениях или несчастных случаях.

Работа в лаборатории подразумевает ношение халата. Если выполняются действия, которые чреваты выделением пыли или газов, органы дыхания необходимо защитить респиратором. При работе с едкими веществами нужно применить средства индивидуальной защиты для рук и глаз, а также фартуки.

Соблюдение техники безопасности при работе в химической лаборатории направлено не только на сохранение здоровья и жизни сотрудников, но и на недопущение аварийных ситуаций. Самая разрушающая из всех существующих – это, разумеется, пожар. Каждое лабораторное помещение обязано соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.004-91, а также иметь средства тушения огня по ГОСТ 12.4.009-83.

Категорически запрещено заниматься в помещении посторонними делами – есть, пить, курить и т. д. Нужно тщательно следить за чистотой реактивов. Нельзя выливать взятый для анализов реактив обратно в тару. Один и тот же инструмент запрещено применять для отбора разных веществ. Нельзя наклоняться над сосудами, в которых кипит жидкость, либо заглядывать в них. Даже если нужно смешать в них вещества, надо держаться на расстоянии. Если идет работа с опасными реактивами, то в лаборатории должно быть как минимум два сотрудника. Эксплуатировать можно лишь исправные оборудование и приборы. Когда заканчиваются аналитические работы, надо отключить электричество, газ и воду. - Оперативное обслуживание электрических установок осуществляется лишь специалистами, имеющими допуск и удостоверение. В процессе эксплуатации таких приборов надо соблюдать правила противопожарной безопасности. Установки, в которых напряжение более 1000 В, обслуживает лишь специально обученный человек. Подключать переносные приемники можно лишь через трансформатор (но не автоматический). Перед этим важно убедиться в том, что он исправен. Чтобы защититься от электротока, надо использовать защитные диэлектрические средства.

Трогать, включать и выключать рубильники и прочие приборы запрещено, если на это не давал разрешения преподаватель. Если замечены нарушения или неисправности, надо об этом сообщить преподавателю. Работая на оборудовании, нужно выполнять те требования, которые были поручены преподавателем. Нельзя отвлекать внимание других сотрудников. При несчастном случае надо немедленно сообщить об этом начальству или старшему лаборанту. По завершении всех дел надо привести в порядок свое место, а также отчитаться об окончании работы преподавателю.

Освоение дисциплины

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности	ИД-1 _{ОПК-1} Основы естественнонаучных и инженерных наук, методов математического анализа и моделирования.	Готовность к контролю технического состояния транспортных средств с использованием средств технического диагностирования
	ИД-2 _{ОПК-1} Применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	Готовность к организации и контролю качества и безопасности процессов сервиса, параметров технологических процессов с учетом требований потребителя
	ИД-3 _{ОПК-1} Навыком применения естественнонаучных и инженерных знаний, методов математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	Способен адаптировать и модифицировать специализированное программное обеспечение, методы и алгоритмы систем искусственного интеллекта и машинного обучения в профессиональной деятельности

Тема лабораторной работы 1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Цель работы: ознакомление с методами измерения температур

Теоретическая часть:

В работе необходимо:

1. Измерить температуру нагревательной поверхности, окружающей среды и воды в колбе с помощью ртутного термометра, хромель-копелиевых термопар, милливольтметра и потенциометра.

Температура характеризует тепловое состояние тела и измеряется в градусах. Температура тела изменяется пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Практически измерить кинетическую энергию молекул непосредственно невозможно. Поэтому для измерения температуры используют различные косвенные методы. Все методы измерения температуры основаны на использовании однозначной взаимосвязи между температурой и другой физической величиной, измеряемой непосредственно (объем, давление, ЭДС, сопротивление и т.д.).

Численное значение температуры зависит от выбранной температурной шкалы. В технике температура измеряется по Международной стогоградусной шкале (шкала Цельсия) и обозначается через $t, ^\circ\text{C}$. В этой шкале при нормальном давлении (760 мм рт. ст.) состоянию тающего льда соответствует температура $0 ^\circ\text{C}$, а точке кипения воды – $100 ^\circ\text{C}$. Для измерения температуры используется также термодинамическая шкала температур (шкала абсолютных температур, или шкала Кельвина). Нуль абсолютной шкалы температур соответствует значению $t = -273,15 ^\circ\text{C}$.

Абсолютная температура тела

$$T, \text{K} = t, ^\circ\text{C} + 273,15 \quad (1)$$

В США и Англии для измерения температуры применяют шкалу Фаренгейта. На этой шкале $t ^\circ\text{F}$ температура таяния льда и температура кипения воды обозначены соответственно через $32 ^\circ$ и $212 ^\circ$ для перевода показаний этой шкалы в $^\circ\text{C}$ и обратно служат соотношения:

$$t ^\circ\text{C} = \frac{5}{9}(t ^\circ\text{F} - 32); \quad t ^\circ\text{F} = \frac{9}{5}(t ^\circ\text{C} + 32) \quad (2)$$

Параметром состояния рабочего тела является абсолютная температура.

Температуру измеряют с помощью устройств, использующих различные термометрические свойства жидкостей, газов и твердых тел. В табл. 2 приведены наиболее распространенные устройства для измерения температуры и практические пределы их применения.

Ртутные стеклянные термометры основаны на свойстве тел менять свой объем в зависимости от температуры. Принцип действия стеклянных термометров расширения основан на тепловом расширении жидкости, заключенной в стеклянный капилляр. В таких термометрах в качестве рабочего вещества обычно применяют ртуть, этиловый спирт, толуол и другие жидкости. Показания жидкостного стеклянного термометра зависят не только от объема жидкости, но и объема стеклянного цилиндра-капилляра (наблюдается изменение объема стеклянного резервуара.). Для изготовления термометров обычно применяют специальные сорта стекла с малым коэффициентом термического расширения. В качестве термометрического тела чаще всего применяют ртуть и спирт.

При точных измерениях температуры при помощи ртутных термометров к их показаниям вводятся следующие поправки:

- 1) основная (инструментальная) поправка Δt ;
- 2) поправка на температуру выступающего столбика ртути Δt_b ;
- 3) поправка на смещение положения нулевой точки Δt_C .

В общем случае определение действительной температуры среды по показаниям ртутного термометра t' производится согласно равенству:

$$t = t' + \Delta t + \Delta t_b + \Delta t_c. \quad (3)$$

При температурах выше 150-200^oC ртутные термометры применяются редко.

Принцип действия манометрических термометров основан на измерении давления газа, жидкости или насыщенного пара в замкнутом объеме в зависимости от температуры.

Принцип действия термометров сопротивления основан на зависимости электрического сопротивления металлов от температуры. Медные термометры сопротивления (ТСМ) используют в интервале температур от 50 до 200^oC. Платиновые термометры сопротивления (ТСП) применяют для измерения температур от 260 до 1100^oC.

В настоящее время для измерения температуры получили широкое применение термопары (термоэлектрические преобразователи).

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы от температуры.

Термопара представляет собой два разнородных проводника, составляющих общую электрическую цепь (рис. 1). Если температуры мест соединений (спаёв) проводников t_r и t_x неодинаковы, то возникает термо-ЭДС. и по цепи протекает ток. Величина термо-ЭДС тем больше, чем больше разность температур.

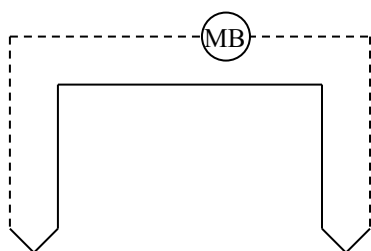


Рис. 1. Схема измерения показаний термопары с помощью милливольтметра

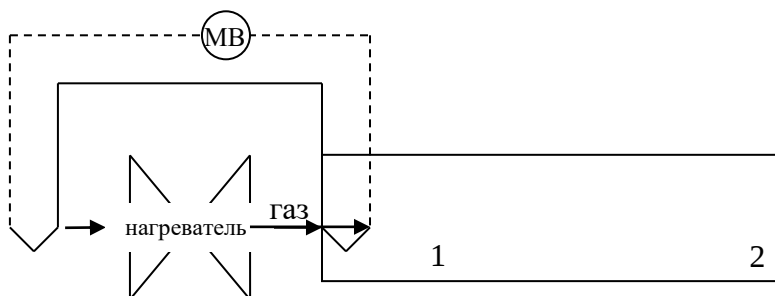


Рис. 2. Схема измерения разности температур газа при помощи дифференциальной термопары.

В качестве материалов для термопар используются различные материалы (сплавы хрома, никеля, алюминия, меди) в виде проволоки диаметром от 0,1 до 0,2 мм. Наиболее распространены следующие пары металлических проволок:

1. Платина и платинородий (90% Pt и 10% Pr). Эта термопара является эталонным прибором.
2. Хромель (90% Ni и 10% Cr) и алюмель (95% Ni и 5% Al). На каждые 100^oC термоЭДС этой термопары составляет около 4 мВ.
3. Хромель и копель (56% Cr и 44% Ni). На каждые 100^oC термо-ЭДС этой термопары приходится около 7 мВ.

4. Медь и константан (60% Сг и 40% Ni). На каждые 100 °С термо-ЭДС этой термопары приходится около 4,3 мВ.

При измерении температуры один спай цепи термопары, так называемый холодный спай, находится при 0 °С (в тающем льде в сосуде Дьюара), а другой – горячий в среде, температуру которой надо измерить.

Так как термо-ЭДС термопары зависит от температуры обоих спаев (горячего и холодного), то термопары часто применяются для измерения разности температур в двух точках – так называемая дифференциальная термопара (рис. 2). В этом случае в схеме отсутствует холодный спай и термо-ЭДС сравнивается с некоторой известной ЭДС вспомогательного источника тока.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из горизонтальной поверхности с электрическим нагревателем, устройств для измерения температуры (ртутный термометр), хромель-копелиевые термопары, потенциометр, милливольтметр.

Потребляемая мощность электрического нагревателя измеряется ваттметром. Регулирование мощности осуществляется при помощи лабораторного автотрансформатора. Измерение ЭДС термопар производится с помощью потенциометра постоянного тока.

Атмосферное давление измеряется барометром, а относительная влажность воздуха – психрометром.

Методика проведения опытов и обработка результатов измерений

При ознакомлении с экспериментальной установкой необходимо проверить правильность включения измерительных приборов и установить стрелки приборов на нуль.

Порядок выполнения работы следующий:

1. Включить нагреватель, и после наступления стационарного режима работы установки измерить температуру поверхности нагревателя с помощью милливольтметра и потенциометра.

2. Поставить колбу с водой на нагревательную поверхность и довести воду до кипения, измеряя при этом температуру с помощью термометра.

3. Действительную температуру воздуха в лаборатории при измерении ртутным термометром определяем по формуле (3).

4. Основная поправка $\Delta t = 0,5$ (указывается в паспорте термометра).

Поправку на температуру выступающего столбика ртути рассчитываем по уравнению

$$\Delta t_b = n \alpha (t' - t_1) \quad (4)$$

где n – число градусов в выступающем ртутном столбике;

α – коэффициент видимого расширения ртути в стекле;

$$\alpha = 0,16 \cdot 10^{-3} \quad 1/^\circ\text{C}$$

t' – температура, показываемая термометром, °С

t_1 – средняя температура выступающего столбика ртути.

Поправку на смещение положения нулевой точки определяем с помощью уравнения:

$$\Delta t_c = t_0 - t'_0 \quad (5)$$

где t_0 и t'_0 – температуры, соответствующие положению нулевой точки термометра по аттестату (после нагрева в термостате) и после очередной проверки нуля в эксплуатации ($t_0 = 0,1^\circ\text{C}$ и после $t'_0 = -0,1^\circ\text{C}$),

Показания приборов и результаты вычислений необходимо занести в таблицу 1.
 Построить температурный график нагрева воды.
 Построить градуировочный график $E=f(t)$.

Практические пределы применения наиболее распространенных устройств для
 промышленных измерений температур

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Пределы длит. пр.	
		нижний	верхний
Тепловое расширение	Жидкостные стеклянные термометры	-190	600
Изменение давления	Манометрические термометры	-160	600
Изменение электрического сопротивления	Электрические термометры сопротивления. Полупроводниковые термометры (термисторы, терморезисторы)	-90	180
Термоэлектрические эффекты /термоЭ.Д.С./	Термоэлектрические термометры Термопары/стандартизированные Термоэлектрические термометры Термопары/специальные	1300	2500
Тепловое излучение	Оптические пирометры	700	6000
	Радиационные пирометры	20	3000
	Фотоэлектрические пирометры	600	4000
	Цветовые пирометры	1400	2800

Таблица 1– Результаты измерений

№ п/п	ВОДА					Нагревательная поверхность		
	Показания ртутного термометра	Основная поправка	Поправка на температуру выступающего столбика /4/	Поправка на смещение положения нулевой точки /5/	Действительная температура	Показания термопар	Показания милливольтметра	Показания термопар
	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_b, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E_1, \text{мВ}$	$^\circ\text{C}$	$E_2, \text{мВ}$

Атмосферное давление _____

Относительная влажность воздуха _____

Контрольные вопросы:

1. Что называются температурой? Охарактеризуйте температурные шкалы? (Цельсия, Кельвина, Фаренгейта).
2. Назовите соотношения между различными температурными шкалами.
3. Как определить действительную температуру, измеренную с помощью различных приборов? Что такое термопара?
4. Дайте характеристику основных видов приборов для измерения температуры.
5. Опишите принципы действия основных видов приборов для измерения температуры.

Тема лабораторной работы 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА.

Цель работы: экспериментальное определение теплоёмкости воздуха при постоянном давлении.

Приборы и материалы: металлический сосуд с крышкой, электронагреватель (ТЭН), циферблатные весы настольного типа ВНЦ-2 (РН-10Ц13), амперметр Э-30, вольтметр Э-30, термометр лабораторный ТЛ-2, секундомер, измерительные инструменты.

Теоретическая часть:

К основным технико-экономическим показателям теплового оборудования относятся: производительность, тепловой коэффициент полезного действия η_m , основной показатель (для оборудования периодического действия – ёмкость рабочей камеры в дм^3 , либо площадь жарочной поверхности в м^2), мощность электронагревателя, либо расход энергоносителя, время разогрева до стандартной рабочей температуры, габариты, масса и ряд удельных показателей - удельные энерго- и металлоёмкость, удельный расход энергии и т.д.

Тепловой к.п.д. оборудования представляет собой отношение количества полезно затраченной теплоты к общему расходу тепла:

$$\eta_m = \frac{Q_1}{Q_{\text{затр}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: Q_1 – количество полезно затраченной теплоты, кДж ;

$Q_{\text{затр}}$ – общий расход тепла, кДж .

Для определения к.п.д. электротеплового аппарата необходимо составить уравнение теплового баланса рассматриваемого технологического процесса для конкретного режима (стационарного или нестационарного). Рассмотрим последовательно режимы «нагрев» и «кипение».

Нестационарный режим (нагрев)

Общее количество теплоты, переданной от нагревательных элементов (ТЭНов) в режиме «нагрев» расходуется на: нагрев продукта до конечной температуры с учетом частичного испарения влаги в этом процессе Q_1 , на разогрев конструктивных элементов аппарата до установившейся температуры Q_2 , и на компенсацию потерь тепла с внешней поверхности аппарата в окружающую среду Q_3 , т.е.

$$Q_{затр} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \text{ кДж} \quad (2)$$

Значение величины Q_1 определяют из уравнения теплового баланса процесса:

$$Q_1 = G_K \cdot C_K \cdot t_B^K - G_H \cdot C_H \cdot t_B^H + \Delta W_1 r \quad (3)$$

где: G_H, G_K – соответственно начальная и конечная масса воды, кг;

C_H, C_K – удельная теплоемкость при начальной и конечной температурах воды, кДж/(кгК)

t_B^K, t_B^H – начальная и конечная температуры воды, °С;

ΔW_1 – количество испарившейся в процессе нагрева жидкости, кг;

r – удельная теплота парообразования при средней за этот период температуре поверхности жидкости, кДж/кг;

$$t_{п.ср.} = 0,5(t_B^H + t_B^K) - 2$$

Значение величины r можно определить по формуле М.И. Фильнея:

$$r = (2500 - 2,38 \cdot t_{п.ср.}), \text{ кДж/кг} \quad (4)$$

Для определения количества теплоты Q_2 используют формулу:

$$Q_2 = \sum_i^n M_i C_i (t_i^K - t_i^H) \quad (5),$$

где: M_i – масса i -го элемента конструкции, кг;

C_i – удельная теплоемкость материала i -го элемента конструкции, кДж/(кгК)

t_i^H, t_i^K – соответственно начальная и конечная температуры i -го элемента, °С.

Теплопотери в окружающую среду Q_3 за время нагрева определяется по формуле:

$$Q_3 = \alpha_{ср} \cdot F (t_{пов.ср.} - t_{пов}) \cdot \tau_p \quad (6),$$

где: $\alpha_{ср}$ – средний за период нагрева коэффициент теплоотдачи с поверхности аппарата в окружающую среду, кВт/(м²К); для цилиндрических облицовок аппаратов, находящихся в помещении и окрашенных эмалью светлых тонов:

$$\alpha_{ср} = [9,4 + 0,052(t_{пов.ср.} - t_{пов})] \cdot 10^{-3} \text{ кВт/(м}^2\text{К)} \quad (7),$$

для цилиндрических облицовок, выполненных из нержавеющей стали или алюминиевых сплавов, при температуре воздуха в помещении:

$$\alpha_{ср} = [5,2 + 0,06(t_{пов.ср.} - t_{пов})] \cdot 10^{-3} \quad (8),$$

где: F – площадь наружных облицовок теплового аппарата, м²;

$t_{пов.ср.}$ – средняя за период нагрева температура поверхностей облицовки, °С.

τ_p – время нагрева жидкости до кипения, с.

$$t_{пов.ср.} = 0,5(t_{пов}^H + t_{пов}^K).$$

Общее количество затраченной теплоты $Q_{затр}^э$, определенное в ходе эксперимента по показаниям амперметра и вольтметра, вычисляется по формуле:

$$Q_{затр}^э = P \cdot \tau_p = I \cdot U \cdot \tau_p \cdot 10^{-3} \text{ кДж} \quad (9),$$

где: P – мощность нагревательных элементов, кВт;

I, U – соответственно сила тока (А) и напряжение питающей сети (В).

Относительная погрешность в эксперименте:

$$\delta = \frac{Q_{затр}^э - Q_{затр}}{Q_{затр}^э} \cdot 100 \% \quad (10)$$

Стационарный режим (кипение)

Уравнение теплового баланса в стационарном режиме имеет вид:

$$Q_{\text{затр}} = Q_1 + Q_3,$$

где: Q_1 – тепловая мощность, расходуемая на поддержание процесса кипения, т.е. на испарение влаги, кВт;

Q_3 – тепловая мощность, компенсирующая теплопотери с поверхности аппарата в окружающую среду, кВт.

Величину Q_1 рассчитывают по формуле:

$$Q_1 = \Delta W_2 \cdot r \quad \text{кВт} \quad (12),$$

где: ΔW_2 – количество влаги, испаряемое в единицу времени, кг/с ;

r – удельная теплота парообразования при температуре кипения жидкости, кДж/кг;

Значение величины Q_3 определяют по формуле:

$$Q_3 = \alpha \cdot F(t_{\text{пов.ср}}^{\text{ж}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau \quad \text{кВт} \quad (13),$$

где: α – коэффициент теплоотдачи с поверхности облицовок аппарата в окружающую среду, кВт/(м²К), вычисленный по формулам (7,8) при температуре поверхности облицовки в стационарном режиме.

Тепловой к.п.д. электротеплового аппарата в стационарном режиме:

$$\eta_m = \frac{Q_1}{Q_{\text{затр}}} \cdot 100 \% \quad (14).$$

Общее количество теплоты $Q_{\text{затр}}^{\text{э}}$, определенное в ходе эксперимента по показаниям амперметра и вольтметра, в стационарном режиме равно:

$$Q_{\text{затр}}^{\text{э}} = I \cdot U \cdot 10^{-3} \quad \text{кВт} \quad (15).$$

Погрешность эксперимента вычисляется по формуле (10).

Производительность теплового аппарата:

$$\Pi = \frac{V \cdot \varphi \cdot \rho}{T_{\text{ц}}},$$

где: V – объем рабочей камеры, м³;

φ – коэффициент заполнения;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$T_{\text{ц}}$ – время технологического цикла (суммарное время загрузки, тепловой обработки и выгрузки), ч.

Удельная металлоемкость:

$$m = \frac{M_1}{V} \quad \text{кг} \cdot \text{м}^3 \quad (17)$$

Удельная металлоемкость:

$$\Xi = \frac{P}{V} \quad \text{кВт} \cdot \text{м}^3 \quad (18)$$

Удельный расход энергии:

$$N_V = P / \Pi \quad \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг} \quad (19)$$

Методика проведения эксперимента

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, нужно ознакомиться с правилами техники безопасности и освоить необходимый теоретический материал курса.

Перед началом испытаний необходимо измерить начальную температуру окружающей среды, основные геометрические размеры теплового аппарата, массу

отдельных элементов конструкции. Массу воды, определяют, взвешивая аппарат вместе с водой и вычитая затем массу конструкции.

Подключив аппарат к сети, измеряют время разогрева, силу тока и напряжения в сети. При закипании воды отключают аппарат и путем взвешивания определяют массу испарившейся влаги.

Вновь подключают аппарат к сети и кипятят, содержимое в течение 5 минут, измеряя температуру кипения жидкости. По истечении указанного времени аппарат взвешивают, определяя массу влаги, испарившейся в стационарном режиме.

Составление отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) перечень приборов и материалов;
- 3) описание лабораторного стенда;
- 4) методику проведения эксперимента;
- 5) расчетную часть;
- 6) выводы о проделанной работе.

Расчетная часть

Нестационарный режим (нагрев):

Нагрев продукта до конечной температуры с учетом частичного испарения влаги равен:

$$Q_1 = G_K \cdot C_K \cdot t_B^K - G_H \cdot C_H \cdot t_B^H + \Delta W_1 r$$

где: $G_H = 0,78 \text{ кг}$ – начальная масса воды;

$G_K = 0,8 \text{ кг}$ – конечная масса воды;

$C_H, C_K = 4,19 \text{ кДж/(кгК)}$ – удельная теплоемкость при начальной и конечной температурах воды;

$t_B^K = 97^\circ\text{C}$ – конечная температура воды;

$t_B^H = 25^\circ\text{C}$ – начальная температуры воды;

$\Delta W_1 = 0,2 \text{ кг}$ – количество испарившейся в процессе нагрева жидкости;

r – Удельная теплота парообразования при средней за этот период температуре поверхности жидкости, кДж/кг ;

$$r = 2500 - 2,38 \cdot t_{п.ср} \quad \text{где}$$

$$t_{п.ср} = 0,5(t_B^H + t_B^K) - 2 = 0,5(25 + 97) - 2 = 59, \quad \text{отсюда}$$

$$r = 2500 - 2,38 \cdot t_{п.ср} = 2500 - 2,38 \cdot 59 = 2438,62 \quad \text{кДж/кг}, \quad \text{тогда}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= G_K \cdot C_K \cdot t_B^K - G_H \cdot C_H \cdot t_B^H + \Delta W_1 r \\ &= 0,78 \cdot 4,19 \cdot 97 - 0,8 \cdot 4,19 \cdot 25 + 0,2 \cdot 2438,62 = 720,9 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Разогрев конструктивных элементов аппарата до установившейся температуры равен:

$$Q_2 = \sum_i^n M_i C_i (t_i^K - t_i^H)$$

где: $M_i = 0,7 \text{ кг}$ – масса i -го элемента конструкции;

$C_i = 1,2 \text{ кДж/(кгК)}$ – удельная теплоемкость материала i -го элемента конструкции,

$t_i^H = 25^\circ\text{C}$ – начальная температура i -го элемента;

$t_i^K = 97^\circ\text{C}$ – конечная температуры i -го элемента;

$$Q_2 = \sum_i^n M_1 C_1 (t_i^K - t_i^H) = \sum 0,7 \cdot 1,2 (97-25) = 60,48 \text{ кВт},$$

Компенсация потерь тепла с внешней поверхности аппарата в окружающую среду равна:

$$Q_3 = \alpha_{CP} \cdot F (t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau_p$$

где: α_{CP} — средний за период нагрева коэффициент теплоотдачи с поверхности аппарата в окружающую среду, кВт/(м²К);

для цилиндрических облицовок, выполненных из нержавеющей стали или алюминиевых сплавов, при температуре воздуха в помещении:

$$\alpha_{CP} = [5,2 + 0,06 (t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}})] \cdot 10^{-3}$$

где: $F = 0,048 \text{ м}^2$ — площадь наружных облицовок теплового аппарата;

$t_{\text{пов.ср.}}$ — средняя за период нагрева температура поверхностей облицовки, °С.

$\tau_p = 480 \text{ с}$ — время нагрева жидкости до кипения;

$$t_{\text{пов.ср.}} = 0,5 (t_{\text{пов}}^H + t_{\text{пов}}^K) = 0,5 (25 + 97) = 61 \text{ °С, тогда}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{CP} &= [5,2 + 0,06 (t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}})] \cdot 10^{-3} \\ &= [5,2 + 0,06 (61 - 25)] \cdot 10^{-3} = 0,00736 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_3 &= \alpha_{CP} \cdot F (t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau_p = \\ &= 0,00736 \cdot 0,048 (61 - 25) \cdot 480 = 6,1 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Общее количество затраченной теплоты равно:

$$Q_{\text{затр}} = P \cdot \tau_p = I \cdot U \cdot \tau_p \cdot 10^{-3}$$

где: $I = 3,5 \text{ А}$ — сила тока;

$U = 220 \text{ В}$ — напряжение питающей сети.

$$Q_{\text{затр}} = I \cdot U \cdot \tau_p \cdot 10^{-3} = 3,5 \cdot 220 \cdot 480 \cdot 10^{-3} = 369,6 \text{ кВт}.$$

Стационарный режим (кипение):

Тепловая мощность, расходуемая на поддержание процесса кипения равна:

$$Q_1 = \Delta W_2 \cdot r$$

где: $\Delta W_2 = 0,1 \text{ кг/с}$ — количество влаги, испаряемое в единицу времени;

$r = 2438,62 \text{ кДж/кг}$ — удельная теплота парообразования при температуре кипения жидкости;

$$Q_1 = \Delta W_2 \cdot r = 0,1 \cdot 2438,62 = 243,86 \text{ кВт}$$

Тепловая мощность, компенсирующая теплопотери с поверхности аппарата в окружающую среду равна:

$$Q_3 = \alpha \cdot F (t_{\text{пов.ср.}}^{\text{ж.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau$$

где: $\alpha = 0,00736 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности облицовок аппарата в окружающую среду,

$F = 0,048 \text{ м}^2$ — площадь наружных облицовок теплового аппарата;

$t_{\text{пов.ср.}}^{\text{ж.}} = 97 \text{ °С}$ — средняя температура поверхности жидкости;

$t_{\text{пов}} = 25 \text{ °С}$ — температура поверхности;

$\tau_p = 300 \text{ с}$ — время нагрева жидкости до кипения;

$$Q_3 = \alpha \cdot F (t_{\text{пов.ср.}}^{\text{ж.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau = 0,00736 \cdot 0,048 (97 - 25) \cdot 300 = 7,63 \text{ кВт}$$

Производительность теплового аппарата равна:

$$\Pi = \frac{V \cdot \varphi \cdot p}{T_{\text{ц}}},$$

где: V - объем рабочей камеры, м³;

$\varphi=1$ – коэффициент заполнения;

p – плотность жидкости, кг/м³;

$T_{\text{ц}}=0,13\text{ч}$ – время технологического цикла (суммарное время загрузки, тепловой обработки и выгрузки),

$$\Pi = \frac{V \cdot \varphi \cdot p}{T_{\text{ц}}} = \frac{1 \cdot 0,8}{0,13} = 6,15 \text{ кг/ч.}$$

Контрольные вопросы:

1. В чем суть внутренней энергии системы? Докажите, что внутренняя энергия – это параметр состояния. В чем различие внутренней энергии идеального и реального рабочих тел?
2. Выведите выражение для работы. Покажите, что площадь под кривой процесса $p - v$ в координатах численно равна работе.
3. Что такое работа и теплота? Что между ними общего и чем они различаются?
4. Выведите уравнение первого закона термодинамики. Дайте формулировку этого закона.
5. Что называется истинная и средняя теплоемкости? Укажите на связь (графическую и аналитическую) между ними. Перечислите различные виды теплоемкости, укажите их единицы и запишите связь между ними.

Тема лабораторной работы 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить основные законы идеальных газов, определить значение газовой постоянной исследуемого газа.

Приборы и материалы: цилиндр с поршнем, термометр лабораторный ТЛ-2, манометр М-4, баня водяная.

Теоретическая часть:

Все рабочие тела состоят из хаотически движущихся молекул, между которыми действуют силы взаимного притяжения или отталкивания.

Под *идеальным* газом понимают воображаемый газ, в котором отсутствуют силы притяжения между молекулами, а собственный объем молекул исчезающе мал по сравнению с объемом междумолекулярного пространства.

В термодинамике законы идеальных газов Бойля – Мариотта, Гей-Люссака, Шарля и другие применяют и для реальных газов при относительно невысоких давлениях и относительно высоких температурах.

Закон Бойля — Мариотта устанавливает зависимость удельного объема идеального газа от его давления при постоянной температуре: *при постоянной температуре удельные объемы газа обратно пропорциональны его давлениям.*

Если обозначить начальный и конечный удельные объемы идеального газа через ν_1 и ν_2 , а соответствующие им абсолютные давления, через p_1 и p_2 , то по закону Бойля – Мариотта:

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{p_1}{p_2} \quad (\text{при } T = \text{const}), \quad (1)$$

откуда

$$p_1 \nu_1 = p_2 \nu_2, \quad (2)$$

или

$$p \nu = \text{const} \quad (\text{при } T = \text{const}) \quad (3)$$

Закон Гей-Люссака устанавливает зависимость удельного объема идеального газа от его температуры при постоянном давлении: *при постоянном давлении удельные объемы идеального газа прямо пропорциональны его абсолютным температурам:*

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{при } p = \text{const}), \quad (4)$$

Где ν_1 и ν_2 - удельные объемы газа в начальном и конечном состояниях, а T_1 и T_2 — соответствующие им абсолютные температуры.

Поменяв в формуле (4) местами средние члены пропорции, получим формулу (5):

$$\frac{\nu_2}{T_2} = \frac{\nu_1}{T_1} \quad (5)$$

или

$$\frac{\nu}{T} = \text{const} \quad (\text{при } p = \text{const}). \quad (6)$$

Закон Шарля устанавливает зависимость давления идеального газа от его температуры при постоянном удельном объеме: *при постоянном: удельном объеме абсолютные давления идеального газа прямо пропорциональны его абсолютным температурам.*

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ (при } \nu = const \text{)}, \quad (7)$$

Поменяв местами средние члены пропорции, получим

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1} \quad (8)$$

или

$$\frac{p}{T} = const \text{ (при } \nu = const \text{)}, \quad (9)$$

Сопоставление законов Бойля-Мариотта, Шарля и Гей-Люссака приводит к обобщенному закону: *отношения произведений давления на удельный объем к абсолютной температуре в любом состоянии данного идеального газа равны между собой:*

$$\frac{p \nu}{T} = const \quad (10)$$

Или

$$p \nu = RT, \quad (11)$$

Где R - характеристическая постоянная идеального газа.

Эту постоянную величину называют *удельной газовой постоянной*.

Уравнение (11) называется *уравнением состояния идеального газа*. Оно связывает три основных параметра (идеального газа p , ν и T). По известным значениям любых двух из них можно определить значение третьего параметра.

Это уравнение, полученное Клапейроном в 1834г., называется *характеристическим уравнением идеального газа* или *уравнением состояния*, которое связывает между собой основные параметры состояния – давление, объем и температуру – может быть представлено следующими уравнениями:

$$pV = mRT \quad (12)$$

$$pV_\mu = \mu RT \quad (13)$$

где: p – давление газа в Па; V – объем газа в м^3 ; m – масса газа в кг; V_μ – объем 1 кмоль газа в $\text{м}^3/\text{кмоль}$; R – удельная газовая постоянная для 1 кг газа в $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$; μR – универсальная газовая постоянная 1 кмоль газа в $\frac{\text{Дж}}{(\text{кмоль} \cdot \text{К})}$.

Д.И.Менделеев впервые предложил для моля газа характеристическое уравнение:

$$p\mu\nu = \mu RT \text{ или } pV_\mu = \mu RT \quad (14)$$

где: $V_\mu = \mu\nu$ – объем моля.

Если записать характеристическое уравнение (14) для нормальных условий, то

$$101325 \cdot 22,4 = \mu R \cdot 273,15 \quad (15)$$

Из этого равенства следует, что

$$R_0 = \mu R = 8314,3 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{град}) \quad (16)$$

Эта постоянная называется *универсальной газовой постоянной*, а характеристическое уравнение (14) уравнением Клапейрона – Менделеева.

Газовая постоянная любого газа

$$R_0 = 8314,3/\mu \quad (17)$$

Пользуясь характеристическим уравнением для двух различных состояний, какого – либо газа, можно получить выражение для определения любого параметра при переходе от одного состояния к другому, если значения остальных параметров известны:

$$\frac{p_1 \nu_1}{T_1} = \frac{p_2 \nu_2}{T_2} \quad (18)$$

или

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (19)$$

Уравнение (19) часто применяют для «приведения объема, к нормальным условиям», т.е. для определения объема, занимаемого газом, при $p = 101325 \text{ Па}$ и $T = 273,15 \text{ К}$ ($p = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ и $t^0 \text{ C}$), если объем его при каких – либо значениях p и t известен. Для этого случая уравнение (19) обычно представляют в виде:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_H V_H}{T_H}, \quad (20)$$

где p_H, V_H, T_H -соответственно нормальные давления, объем и температура.

В правой части уравнения все величины взяты при нормальных условиях, а левой – при произвольных значения давления и температуры.

Уравнение (2 – 19) можно переписать следующим образом:

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (21)$$

следовательно,

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (22)$$

Уравнение (22) позволяет найти плотность газа при любых условиях, если значения его для определенных условий известно.

Порядок проведения работы и обработки опытных данных

1. Идеальный газ, заключенный в цилиндре с поршнем, имеет параметры p_1, ν_1 и T_1 (положение a на рис. 1). Уменьшив давление газа в цилиндре и подведя к нему некоторое количество теплоты, переведем газ в новое состояние, в котором параметры примут значения p_2, ν_2 и T_2 (положение b на рис. 1).
2. Установим связь между начальными и конечными параметрами идеального газа. Для этого переход из состояния a в состояние b совершим двумя последовательными операциями.
3. Сначала уменьшим давление газа от p_1 до p_2 , поддерживая температуру T_1 постоянной путем подвода теплоты к газу. Таким образом, газ окажется в некотором промежуточном состоянии c с параметрами p_2, ν_3 и T_1 .
4. Будем подогревать газ так, чтобы он продолжал расширяться, сохраняя давление p_2 неизменным, а температура его при этом повысится до T_2 (положение b на рис. 1).
5. Сопоставим эти три состояния газа a, b и c . Так как в состояниях a и c температуры одинаковы, то между удельными объемами и давлениями газа в этих состояниях должна существовать связь по закону Бойля – Мариотта, Гей-Люссака.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2} \Rightarrow v_2 = \frac{p_1 \cdot v_1}{p_2};$$

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow v_3 = \frac{T_1 \cdot v_2}{T_2}.$$

6. Определим по формуле (17) значение универсальной газовой постоянной R.
7. Результаты расчетов занести в таблицу 1.

Таблица 1

опыт	$P, \text{МПа}$	$\nu, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$	$T, \text{К}$
1			
2			

Контрольные вопросы

1. Проанализируйте процесс парообразования в $p - \nu$ -, $T - s$ -, $h - s$ -координатах. Укажите их общие черты и отличительные особенности.
2. Что такое влажный насыщенный, сухой насыщенный и перегретый пар? Укажите закономерности изменения основных параметров состояния в процессах нагревания воды, парообразования и перегрева.
3. Запишите уравнения, определяющие закономерности изменения параметров состояния жидкости и пара. Дайте им объяснение.
4. Проанализируйте процессы изменения состояния пара (изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный). Укажите особенности процессов в области влажного и перегретого пара.

Тема лабораторной работы 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Цель работы: экспериментальное определение параметров состояния влажного воздуха.

Теоретическая часть:

Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха с водяным паром. По своему физическому состоянию влажный воздух близок к идеальным газам.

Поскольку влажный воздух рассматривается как смесь идеальных газов, то к нему применим закон Дальтона, согласно которому сумма парциальных давлений компонентов равна давлению смеси:

$$P_{вл} = P_v + P_{п} \quad (1),$$

где: $P_{вл}$ – давление влажного воздуха;

P_v – парциальное давление сухого воздуха в смеси;

$P_{п}$ – парциальное давление водяного пара.

Парциальное давление водяного пара, находящегося во влажном воздухе при некоторой температуре, не может быть больше, чем давление насыщенного пара при данной температуре, т.к. при этом давлении пар начинает конденсироваться с выпадением капелек жидкости. Следовательно, максимальное количество водяного пара, которое может находиться в 1 м^3 смеси, т.е. плотность водяного пара равна плотности сухого насыщенного пара при заданной температуре. Смесь, состоящая из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, называют насыщенным влажным воздухом.

Влажный воздух, который не содержит при данном давлении и температуре максимально возможное количество водяного пара называется ненасыщенным. Ненасыщенный влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и перегретого пара.

Температура влажного воздуха, при которой пар находится в насыщенном состоянии, называется температурой точки росы. Снижение температуры ниже температуры точки росы приводит к конденсации пара.

Относительная влажность воздуха $\varphi\%$ называется отношением плотности водяного пара при его парциальном давлении и температуре смеси к плотности сухого насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_{н}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

При принятом допущении, что водяной пар обладает свойствами идеального газа, относительная влажность может быть выражена через парциальное давление пара:

$$\varphi = \frac{P_{п}}{P_{н}} \cdot 100, \% \quad (3),$$

где: $P_{п}$ – парциальное давление пара в смеси;

$P_{н}$ – давление насыщенного пара при температуре влажного воздуха.

Величиной, широко применяемой в технических расчетах для характеристики состояния влажного воздуха, является влагосодержание.

Влагосодержанием d влажного воздуха называется количество водяного пара в граммах, содержащиеся в 1 кг сухого воздуха:

$$d = \frac{m_n}{m_{в}}, \quad (4)$$

В этом случае влагосодержание связано с парциальным давлением водяного пара соотношением:

$$d = 622 \frac{P_n}{P_{\text{возд}} - P_n}, \quad (5)$$

Для удобства расчетов энтальпия влажного воздуха относится к 1 кг сухого воздуха.

При принятом допущении об идеальности водяного пара и воздуха, энтальпия влажного воздуха не зависит от давления и определяется по уравнению:

$$i_{\text{возд}} = i_e + \frac{d}{1000} \cdot i_n,$$

где: $i_{\text{возд}}$ – энтальпия сухого воздуха;

i_n – энтальпия пара, содержащегося во влажном воздухе.

Энтальпию компонентов влажного воздуха, можно выразить через их теплоемкость и температуру. Тогда формула для расчета энтальпии влажного воздуха будет иметь вид:

$$i_{\text{возд}} = C_p^B \cdot t + \frac{d}{1000} (r_0 + C_p^П \cdot t), \quad (6)$$

где: $C_p^B = 1,00 \text{ кДж/кгК}$ – изобарная теплоемкость воздуха;

$r_0 = 2501 \text{ кДж/кгК}$ – теплота парообразования воды в тройной точке;

$C_p^П = 1,92 \text{ кДж/кгК}$ – изобарная теплоемкость водяного пара.

Уравнения (1) – (6) позволяют провести расчет процессов изменения состояния влажного воздуха. Однако, расчеты значительно упрощаются, и становятся нагляднее, если используются графические методы с применением i, d – диаграммы, i, d – диаграмма строится на основании (1) – (6).

Наиболее часто состояние воздуха задается двумя параметрами – его температурой и относительной влажностью. Для определения относительной влажности применяются специальные приборы – психрометры и гигрометры.

Устройство и принцип работы аспирационного психрометра

Психрометр является наиболее распространенным прибором для определения относительной влажности воздуха.

Принцип работы психрометра основан на разности показаний сухого и смоченного термометров в зависимости от влажности окружающего воздуха. Психрометр имеет два ртутных термометра – сухой 1 и мокрый 2, чувствительная часть которого обернута батистом, смачиваемым водой. При этом сухой термометр показывает действительную температуру воздуха, а мокрый с некоторой степенью приближения – теоретическую температуру мокрого термометра.

Показания мокрого термометра тем ближе к теоретической температуре мокрого термометра, чем больше скорость потока, обдувающего чувствительную часть термометра, т.к. при этом меньше сказывается приток тепла излучением и теплопроводностью. Поэтому психрометр снабжен специальным вентилятором 3, который создает поток воздуха со скоростью 2 м/с. Привод вентилятора осуществляется при помощи электродвигателя. Для предотвращения притока тепла чувствительная часть термометра экранируется трубками 4 и 5.

Порядок наблюдения по психрометру и обработка опытных данных:

- а) смачивают батист на резервуаре термометра. Для этого используют резиновый баллон с пипеткой, заранее заполненный дистиллированной водой,
- б) включают электромотор,
- в) через 4 минуты после включения электромотора проводят отсчеты по термометрам,

д) по формулам (3), (5) и (6) или по i, d - диаграмме определяется парциальное давление пара в смеси (P_{II}), влагосодержание (d) и энтальпия влажного воздуха ($i_{BЛ}$).

е) результаты вычислений занести в таблицу.

Зависимость давления насыщенного пара от t_M , °С

18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
15,6	16,6	17,5	18,8	20,0	21,3	22,5	22,8	25,4	27,0	28,6	30,2	31,8

Психометрическая таблица

[illegible]

21		20	27	34	38	45	53	60	68	75	84	92	100									
22			23	30	34	40	47	54	61	68	77	84	92	10								
23			19	26	30	36	42	45	55	62	76	77	84	93	10							
24				23	26	32	37	44	45	56	64	70	77	85	92	100						
25				19	23	28	33	39	45	51	59	60	72	79	85	93	100					
26					19	24	30	35	40	46	53	58	65	72	78	85	91	100				
27						21	26	32	37	37	42	48	53	60	67	73	85	93	100			
28							23	28	33	38	40	48	55	60	67	73	79	85	93	100		
29								25	30	35	39	44	49	56	61	68	72	80	86	94	100	
30								22	27	32	36	40	46	51	7	63	67	74	81	87	94	100

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение насыщенного и ненасыщенного влажного воздуха. Укажите возможные пути получения насыщенного влажного пара.
2. Дайте определение влагосодержания, абсолютной и относительной влажности воздуха.
3. Дайте анализ процессам нагревания, охлаждения и осушения воздуха. Решите с помощью $h-d$ -диаграммы ряд конкретных задач.

Тема лабораторной работы 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: 1. выявить различные механизмы переноса тепла, расчетное и экспериментальное определение основных характеристик комбинированного теплообмена: количеств тепла, передаваемого от ее поверхности тепловым излучением и конвекцией, коэффициента теплоотдачи горизонтальной трубы и степени черноты ее поверхности; 2. Определить коэффициент теплопроводности теплоизолирующего материала.

Приборы и материалы: лабораторная установка, цифровой вольтметр, амперметр, цифровой мультиметр, хромель-копелевые термопары, лазерный инфракрасный термометр.

Теоретическая часть:

Существует три основных механизма переноса тепла, каждый из которых имеет свою физическую природу и описывается своими законами и уравнениями. Это - теплопроводность, тепловая конвекция и тепловое излучение.

В практике все эти механизмы чаще всего действуют одновременно. Если они могут быть каким либо образом дифференцированы и определены, то в дальнейшем за счет различных технических средств, возможно, скорректировать в нужном направлении действия того или иного механизма переноса тепла. При этом независимо от механизма переноса, тепловой поток всегда направлен от более нагретого тела к менее нагретому телу и основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена, является разность температур.

В настоящей работе на примере нагретой горизонтальной трубы необходимо определить количество тепла, выделяемого внутренним источником - трубчатым электронагревателем, установленным внутри трубы; вычислить плотность теплового потока, передаваемого от нагревателя через цилиндрический слой теплоизоляционного материала к ее наружной поверхности и рассеиваемого тепловым излучением и конвекцией в окружающую среду. В условиях стационарного теплообмена и отсутствия утечек тепла по узлам крепления трубы ее тепловой баланс выражается соотношением:

$$Q_{\Sigma} = Q_K + Q_L \quad (1)$$

где Q_{Σ} - тепловая мощность, выделяемая электронагревателем,

Q_K - тепловой поток, отдаваемый поверхностью трубы конвекцией,

Q_L - тепловой поток, отдаваемый излучением.

Различают свободную и вынужденную конвекцию. Вынужденная конвекция возникает под действием внешних сил при движении тела в неподвижной среде или при обтекании его сплошным потоком жидкости или газа. В отличие от этого свободная или естественная конвекция возникает исключительно за счет разности температур тела и окружающей среды и локализована в небольшой области вокруг тела, называемой пограничным слоем. Жидкость или газ, нагреваясь или охлаждаясь в этом слое, изменяет свою плотность и за счет действия выталкивающих Архимедовых сил начинает двигаться, интенсифицируя теплообмен по сравнению с чистой теплопроводностью. Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, как правило, на несколько порядков ниже, чем при вынужденной. Измерив напряжение U и силу тока I , температуры наружной поверхности $t_{ст}$ и окружающей среды - t_0 , можно экспериментально определить

коэффициент теплоотдачи горизонтальной трубы. Дополнительно в настоящей работе он рассчитывается и по критериальным соотношениям, полученным на основании теории подобия.

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n,$$

где Nu - безразмерное число (критерий) Нуссельта, характеризующее отношение теплового потока, отдаваемого поверхностью тела конвекцией к тепловому потоку, передаваемому теплопроводностью через слой среды толщиной, равной диаметру трубы.

Gr - критерий Грасгофа, равный отношению выталкивающей силы, действующей на нагретые объемы жидкости или газа к силам вязкости.

Pr - критерий Прандтля, характеризующий соотношение вязкости и температуропроводности среды.

В таблицах 10.1 и 10.2 приводятся необходимые данные для расчета критериев подобия Nu , Gr , Pr .

Таблица 10.1 - Теплофизические свойства сухого воздуха при $P=0,101$ МПа

$t_0, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$c, \text{Дж/г}\cdot\text{К}$	Pr
0	1,293	0,0244	$13,2\cdot 10^{-6}$	1,005	0,707
20	1,205	0,0259	$15,1\cdot 10^{-6}$	1,005	0,703
40	1,128	0,0267	$17,0\cdot 10^{-6}$	1,005	0,699
60	1,029	0,0290	$18,0\cdot 10^{-6}$	1,005	0,696
80	1,000	0,0305	$21,1\cdot 10^{-6}$	1,009	0,692
100	0,946	0,0321	$23,1\cdot 10^{-6}$	1,009	0,690

Таблица 10.2. Значения C и n критериального уравнения $Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$

Режим свободной конвекции	$(Gr \cdot Pr)$	C	n
Пленочный	$1\cdot 10^{-5}$	0,5	0
Переходный	$5\cdot 10^2$	1,18	0,125
Ламинарный	$2\cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентный	$1\cdot 10^{15}$	0,135	0,33

Если дополнительно измерить температуру на поверхности нагревателя - t_n , то по формулам стационарной теплопроводности бесконечного цилиндра можно также определить коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К) теплоизоляционного материала, находящегося между электрическим нагревателем и наружной поверхностью трубы.

Описание экспериментальной установки

Рабочая часть установки представляет собой модель теплоизолированного трубопровода и выполнена в виде трубы с наружным диаметром 34 мм, длиной 360 мм, внутри которой установлен трубчатый нагреватель диаметром 20 мм (рисунок 10.1). Пространство между нагревателем и наружным кожухом из полированного алюминия заполнено теплоизолирующим материалом. Для исключения утечек тепла по торцам трубы они заизолированы, а сама труба вывешена на точечных опорах. Электрическое напряжение U , подаваемое на нагреватель, регулируется с помощью автотрансформатора и измеряется цифровым вольтметром. Величина тока I - измеряется с помощью амперметра. В качестве датчиков температуры используются хромель-копелевые термопары, ЭДС которых измеряется цифровым мультиметром. Его показания проградуированы в градусах Цельсия. Степень черноты поверхности определяется сравнением ее температур, измеренных термопарой и лазерным инфракрасным термометром.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, таблицы 10.1- 10.2 для расчетного определения коэффициента теплоотдачи и таблицу 10.3 для записи результатов измерений и вычислений.

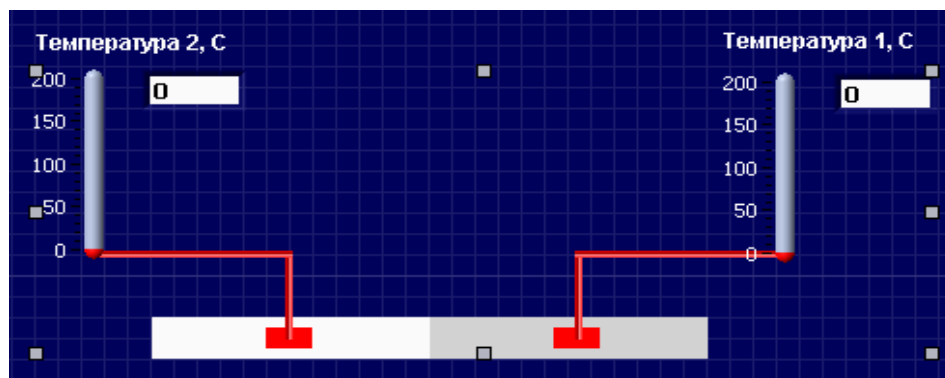


Рисунок 10.1 Схема лабораторной установки

2. При достижении стационарного режима (не менее 20 минут после включения нагревателя) произвести измерения величин I , U , t_n , $t_{ст}$ и t_0 . Результаты занести в таблицу 10.3. Обратить внимание на характер изменения температур t_n , $t_{ст}$ в процессе нагревания трубы.

3. Вычислить по формулам (1- 9) и занести в таблицу 3 значения Q_{Σ} , Q_l и Q_k , $\alpha^{эксп}$ и λ .

4. Перенести в таблицу данные, полученные для других значений I , U , t_n , $t_{ст}$ и t_0 .
Таблица 10.3 - Результаты измерений и вычислений

N, п/п	U, В	I, А	t_n , °С	$t_{ст}$, °С	t_0 , °С	Q_{Σ} , Вт	Q_l , Вт	Q_k , Вт	$\alpha^{эксп}$, Вт/м²К	λ , Вт/м*К	$\alpha^{расч}$, Вт/м²К
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Обработка экспериментальных данных

- 1) по результатам выполненных измерений рассчитывается количества тепла, выделяемое электронагревателем

$$Q_{\Sigma} = I \cdot U, \quad (2)$$

- 2) по закону Стефана-Больцмана рассчитывается поток тепла, отдаваемый поверхностью трубы в окружающую среду тепловым излучением

$$Q_l = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \left(\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right), \quad (3)$$

где ε - степень черноты наружной поверхности трубы (для нержавеющей стали $\varepsilon = 0,43$; для масляной краски $\varepsilon = 0,78$),

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ - коэффициент теплового излучения абсолютно черного тела,

$F = \pi \cdot d \cdot L$ - площадь поверхности трубы, (м²),

D_2 - ее наружный диаметр, (м),

L - длина трубы, (м),

$T_{ст}$, T_0 - температура наружной стенки трубы и окружающей среды, (К).

- 3) поток тепла, отдаваемый конвекцией, определяется как разность

$$Q_k = Q_{\Sigma} - Q_l, \quad (4)$$

- 4) величина коэффициента теплоотдачи $\alpha^{эксп}$ рассчитывается по формуле

$$\alpha^{эксп} = \frac{Q_k}{F \cdot (t_{cm} - t_0)}, \quad (5)$$

здесь $t_{ст}$, t_0 - температура наружной стенки трубы и окружающей среды, (°С).

5) полученные значения $\alpha_{\text{эксп}}$ заносятся в таблицу и строится график зависимости коэффициента теплоотдачи горизонтальной трубы при свободной конвекции от разности температур ($t_{\text{ст}} - t_0$).

6) расчетное значение коэффициента теплоотдачи может быть определено на основе приведенного ранее критериального уравнения, постоянные величины C и n которого, зависят от режима свободной конвекции. Они определяются в зависимости от произведения критерия Грасгофа и критерия Прандтля. Значение критерия Прандтля для заданной температуры наружной поверхности трубы можно взять из таблицы 10.1, а значение критерия Грасгофа, рассчитывается по формуле

$$G_r = g \cdot d_2^3 \cdot \frac{t_{\text{cm}} - t_0}{\nu^2 \cdot \left(\frac{t_{\text{cm}} + t_0}{2} + 273 \right)}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения,

ν – кинематическая вязкость воздуха (таблица 10.1)

7) по вычисленному произведению ($G_r \cdot P_r$), пользуясь таблицей 10.2, определить режим свободно конвективного течения воздуха у нагретой трубы и коэффициенты C и n критериального уравнения (7) и вычислить значение критерия Нуссельта

$$Nu = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n, \quad (7)$$

8) по вычисленному критерию Нуссельта рассчитать значение $\alpha^{\text{расч}}$

$$\alpha^{\text{расч}} = \frac{\lambda}{d_2 \cdot Nu}, \quad (8)$$

здесь $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха (таблица 10.1).

Нанести $\alpha^{\text{расч}}$ на график $\alpha = F(t_{\text{ст}})$. Сравнить между собой $\alpha^{\text{расч}}$ и $\alpha_{\text{эксп}}$.

9) определить коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К) теплоизоляционного материала, находящегося между электрическим нагревателем и наружной поверхностью трубы

$$\lambda = \frac{Q_{\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{d_2}{d_1} \right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{\text{cm}} - t_0)}, \quad (9)$$

10) Сделать выводы по работе, которые должны содержать: краткое описание содержания выполненной работы и основные характеристики экспериментальной установки; численные значения экспериментально определенных показателей; оценку их изменения от режимных параметров; сравнения с данными, полученными расчетным путем, и оценку возможных ошибок измерения.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются друг от друга различные механизмы переноса тепла?
2. Какие технологические процессы в промышленности сопровождаются нестационарной теплопроводностью, свободной конвекцией, тепловым излучением?
3. Как изменяется теплопроводность различных тел при повышении температуры?
4. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
5. Почему для расчета конвективного теплообмена используются критериальные зависимости? Каков физический смысл критериев подобия, используемых в данной работе?

Тема лабораторной работы 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

Цель работы: 1. Закрепить сведения о физической сущности переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному;
2. Провести анализ факторов, влияющих на оптимизацию теплопередачи процесса;
3. Приобрести навыки экспериментального исследования теплообменных аппаратов.

Приборы и материалы: лабораторная установка, расходомер, мерный бак, секундомер.

Теоретическая часть:

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на три вида: рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В теплообменных аппаратах рекуперативного типа тепло передается от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку, которая называется поверхностью нагрева теплообменного аппарата.

Интенсивность работы теплообменного аппарата характеризуется количеством тепла, передаваемого через единицу поверхности нагрева в единицу времени. Эта величина зависит от физических свойств теплоносителей (вязкость, теплопроводность, плотность, теплоемкость), от режима их движения, от конструктивных особенностей аппарата (размеры, материал, состояние поверхности нагрева), от средней по поверхности нагрева разности температур между греющей и обогреваемой средой.

При расчете теплообменных аппаратов изменение температур теплоносителей при их движении по теплообменнику учитывается введением в расчетную формулу среднего логарифмического температурного напора Δt . Влияние остальных факторов учитывают введением коэффициента теплопередачи k , который по физическому смыслу представляет собой количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности нагрева при разности температур между теплоносителями в один градус. Формула для расчета количества тепла, передаваемого в теплообменном аппарате за единицу времени, имеет вид:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t.$$

Значение среднего логарифмического напора Δt зависит от начальных t_1 и t_3 и конечных t_2 и t_4 температур теплоносителей, а также от схемы включения теплообменного аппарата, т.е. от взаимных направлений движения теплоносителей.

Существует три основные схемы включения: прямоточная, противоточная и перекрестная, а также множество смешанных схем, получаемых в результате различных комбинаций основных схем.

Прямоточная схема (прямоток). При этой схеме движения горячий и холодный теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в одном направлении так, что на входе в аппарат тепло передается от горячего теплоносителя к холодному при относительно большой разности температур. На выходе из аппарата тепло передается от остывшего горячего теплоносителя к холодному при меньшей разности температур. Противоточная схема (противоток). При этой схеме движения теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в противоположных так, что входящий в аппарат горячий теплоноситель отдает тепло уже подогретому теплоносителю.

Для определения коэффициента теплопередачи требуется количество тепла, переданного за единицу времени в теплообменном аппарате, среднюю разность температур Δt между горячим и холодным теплоносителями и размер поверхности F . Количество тепла определяется по расходу теплоносителей, их теплоемкости и изменению их температуры в теплообменном аппарате. В идеальном аппарате, работающем без теплообмена с окружающей средой, количество тепла, отданное горячим теплоносителем Q_1 , должно равняться количеству тепла Q_2 , полученному холодным теплоносителем:

$$Q_1 = Q_2 = k \cdot F \cdot \Delta t; \quad K = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}.$$

где Δt – средний логарифмический напор, определяется по температурам в зависимости от движения теплоносителей.

Пластинчатые теплообменные аппараты используют в качестве пастеризационно-охладительных агрегатов. Основным элементом этих теплообменников являются пластины 1, отштампованные на станине 2, образуется своеобразный «пакет». Поверхность пластин имеет выступы 4, которые образуют многочисленные каналы между пластинами. По этим пластинам тонкими слоями протекают жидкости. Слои жидкостей чередуются, поэтому теплообмен у каждого слоя жидкости происходит через обе ограничивающие поверхности. Уплотнение пластин обеспечивается резиновыми прокладками 3, приклеенными по периферии. Зачастую пластины компоуются в группы. Группа пластин, образующих систему параллельных каналов, в которых данный теплоноситель движется только в одном направлении, составляет пакет. Такой пакет подобен пучку одного хода многоходового кожухотрубного теплообменника.

Различная компоновка пластин в группах, групп в пакетах и пакетов на раме приводит к большому разнообразию компоновочных схем, наилучшим образом приспособленных для выполнения определенных технологических функций.

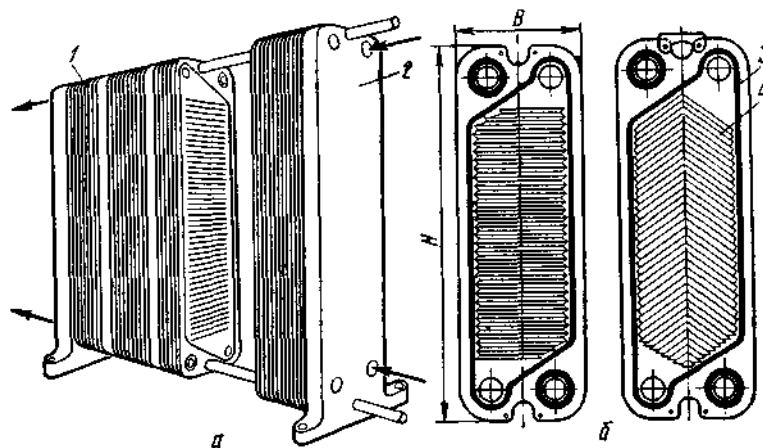


Рисунок. 11.1 - Пластинчатый теплообменник:

a — общий вид; *б* — пластины; 1 — пластины, 2 — станина, 3 — резиновые прокладки; 4 — выступы пластин

Аппараты могут быть как разборные, состоящие из отдельных пластин, так и полуразборные, в которых пластины попарно сварены. В условном обозначении компоновочной схемы указывают: в числителе (сумма) – число пакетов для горячего теплоносителя, в знаменателе – то же, для холодного теплоносителя. Каждое слагаемое означает число параллельных пакетов в каждом пакете (см. рисунок 11.2).

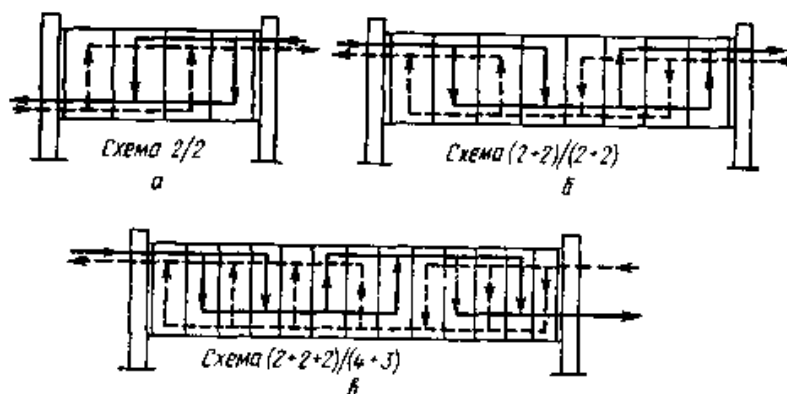


Рисунок 11.2 - Примеры компоновочных схем пластинчатых теплообменников: пятипакетная схема (три пакета для горячего теплоносителя, два – для холодного)

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (Рисунок 11.3) состоит из котла, нагревающего воду до необходимой температуры, которая регулируется переключателем. Теплая вода по трубопроводу насосом подается в пластинчатый теплообменник, поверхность теплообмена которого определяется по формуле:

$$F = F_1 \cdot (n-1) - F_1;$$

где F_1 – площадь поверхности одной пластины, м^2 ;

n – число пластин в теплообменнике, шт.

По второму контуру теплообменника подается холодная вода из центрального водоснабжения. Для измерения температур теплоносителей служат термомпары 1, 2, 3, 4, установленные на входе и выходе из пластинчатого теплообменника. Объем горячей воды измеряется расходомером, холодной – мерной колбой.

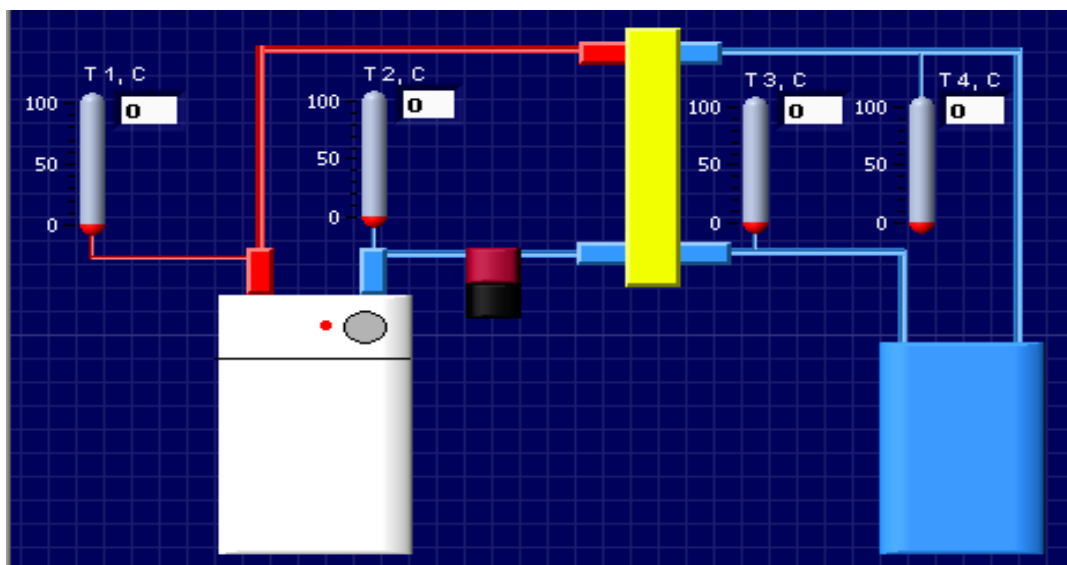


Рисунок 11.3 – Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов.
2. Включить установку и дать прогреться котловой воде.

3. После включения холодной воды измеряют расход горячего и холодного теплоносителя и время проведения опыта.

4. Изменение температур теплоносителей в процессе фиксируется датчиками. Результаты измерений выводятся на компьютер.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить расход горячего и холодного теплоносителей:

$$G = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3 / \text{с};$$

где V – объем теплоносителя, м^3 ;
 τ – время проведения опыта, с.

2. Определение количества получаемой и отдаваемой теплоты:

$$Q_1 = G_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot (t_1 - t_3);$$

$$Q_2 = G_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot (t_4 - t_2),$$

где $\rho_1 = \rho_2$, $\text{кг}/\text{м}^3$ – плотности теплоносителей;
 $c_1 = c_2$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – удельная массовая теплоемкость воды при определяющей температуре $t_m = 0,5 \cdot (t_1 + t_3)$.

3. Определить разность температур на входе и выходе из теплообменника:

$$\Delta t_n = t_1 - t_3; \quad \Delta t_k = t_4 - t_2.$$

4. Средний логарифмический температурный напор определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}};$$

5. Определяем коэффициент теплопередачи по формуле:

$$K = \frac{Q_2}{F \cdot \Delta t},$$

6. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Результаты измерений и вычислений

№, п/п	Расход горячего теплоносителя, $\text{м}^3/\text{с}$	Расход холодного теплоносителя, $\text{м}^3/\text{с}$	Количество получаемой теплоты, кДж	Количество отдаваемой теплоты, кДж	Разность температур на входе в теплообменник, Δt_n	Разность температур на выходе из теплообменника, Δt_k	Средний логарифмический напор, $^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Контрольные вопросы

1. Для каких целей предназначены теплообменные аппараты?
2. Что называется коэффициентом теплопередачи? Каков его физический смысл?
3. Какие величины влияют на величину коэффициента теплопередачи?
4. В чем заключается преимущество противоточной схемы по сравнению с прямоточной?
5. Может ли температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменника быть меньше температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника?
6. В каких случаях при расчете теплообменника можно пользоваться средним арифметическим температурным напором?
7. Дать характеристику пластинчатому теплообменнику.
8. Расскажите схему лабораторной установки и принцип ее действия.

Тема лабораторной работы 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ.

Цель работы: экспериментальное определение технико-экономических показателей водонагревателя в различных режимах.

Приборы и материалы: металлический сосуд с крышкой, электронагреватель (ТЭН), циферблатные весы настольного типа ВНЦ-2(РН-10Ц13), амперметр Э-30, вольтметр Э-30, термометр лабораторный ТЛ-2, секундомер, измерительные инструменты.

Теоретическая часть:

К основным технико-экономическим показателям теплового оборудования относятся: производительность, тепловой коэффициент полезного действия η_m , основной показатель (для оборудования периодического действия – емкость рабочей камеры в дм^3 , либо площадь жарочной поверхности в м^2), мощность электронагревателя, либо расход энергоносителя, время разогрева до стандартной рабочей температуры, габариты, масса и ряд удельных показателей – удельные энерго- и металлоемкость, удельный расход энергии и т.д.

Тепловой к.п.д. оборудования представляет собой отношение количества полезно затраченной теплоты к общему расходу тепла:

$$\eta_m = \frac{Q_1}{Q_{\text{затр}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: Q_1 – количество полезно затраченной теплоты, кДж ;
 $Q_{\text{затр}}$ – общий расход тепла, кДж .

Для определения к.п.д. электротеплового аппарата необходимо составить уравнение теплового баланса рассматриваемого технологического процесса для конкретного режима (стационарного или нестационарного). Рассмотрим последовательно режимы «нагрев» и «кипение».

Нестационарный режим (нагрев)

Общее количество теплоты, переданной от нагревательных элементов (ТЭНов) в режиме «нагрев» расходуется на: нагрев продукта до конечной температуры с учетом частичного испарения влаги в этом процессе Q_1 , на разогрев конструктивных элементов аппарата до установившейся температуры Q_2 , и на компенсацию потерь тепла с внешней поверхности аппарата в окружающую среду Q_3 , т.е.

$$Q_{\text{затр}} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \text{ кДж} \quad (2)$$

Значение величины Q_1 определяют из уравнения теплового баланса процесса:

$$Q_1 = G_K \cdot C_K \cdot t_B^K - G_H \cdot C_H \cdot t_B^H + \Delta W_1 r \quad (3)$$

где: G_H, G_K – соответственно начальная и конечная масса воды, кг ;

C_H, C_K – удельная теплоемкость при начальной и конечной температурах воды, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

t_B^K, t_B^H – начальная и конечная температуры воды, $^{\circ}\text{C}$;

ΔW_1 – количество испарившейся в процессе нагрева жидкости, кг ;

r – удельная теплота парообразования при средней за этот период температуре поверхности жидкости, $\text{кДж}/\text{кг}$;

$$t_{\text{п.ср.}} = 0,5(t_B^H + t_B^K) - 2$$

Значение величины r можно определить по формуле М.И. Фильнея:

$$r = (2500 - 2,38 \cdot t_{\text{п.ср.}}), \text{ кДж}/\text{кг} \quad (4)$$

Для определения количества теплоты Q_2 используют формулу:

$$Q_2 = \sum_i^n M_i C_i (t_i^K - t_i^H) \quad (5),$$

где: M_i – масса i -го элемента конструкции, кг;

C_i – удельная теплоемкость материала i -го элемента конструкции, кДж/(кгК)

t_i^H, t_i^K – соответственно начальная и конечная температуры i -го элемента, °С.

Теплопотери в окружающую среду Q_3 за время нагрева определяется по формуле:

$$Q_3 = \alpha_{CP} \cdot F (t_{ПОВ.СР} - t_{ПОВ}) \cdot \tau_p \quad (6),$$

где: α_{CP} – средний за период нагрева коэффициент теплоотдачи с поверхности аппарата в окружающую среду, кВт/(м²К); для цилиндрических облицовок аппаратов, находящихся в помещении и окрашенных эмалью светлых тонов:

$$\alpha_{CP} = [9,4 + 0,052 (t_{ПОВ.СР} - t_{ПОВ})] \cdot 10^{-3} \text{ кВт/(м}^2\text{К)} \quad (7),$$

для цилиндрических облицовок, выполненных из нержавеющей стали или алюминиевых сплавов, при температуре воздуха в помещении:

$$\alpha_{CP} = [5,2 + 0,06 (t_{ПОВ.СР} - t_{ПОВ})] \cdot 10^{-3} \quad (8),$$

где: F – площадь наружных облицовок теплового аппарата, м²;

$t_{ПОВ.СР}$ – средняя за период нагрева температура поверхностей облицовки, °С.

τ_p – время нагрева жидкости до кипения, с.

$$t_{ПОВ.СР} = 0,5 (t_{ПОВ}^H + t_{ПОВ}^K).$$

Общее количество затраченной теплоты $Q_{ЗАТР}^э$, определенное в ходе эксперимента по показаниям амперметра и вольтметра, вычисляется по формуле:

$$Q_{ЗАТР}^э = P \cdot \tau_p = I \cdot U \cdot \tau_p \cdot 10^{-3} \text{ кДж} \quad (9),$$

где: P – мощность нагревательных элементов, кВт;

I, U – соответственно сила тока (А) и напряжение питающей сети (В).

Относительная погрешность в эксперименте:

$$\delta = \frac{Q_{ЗАТР}^э - Q_{ЗАТР}}{Q_{ЗАТР}^э} \cdot 100 \% \quad (10)$$

Стационарный режим (кипение)

Уравнение теплового баланса в стационарном режиме имеет вид:

$$Q_{ЗАТР} = Q_1 + Q_3,$$

где: Q_1 – тепловая мощность, расходуемая на поддержание процесса кипения, т.е. на испарение влаги, кВт;

Q_3 – тепловая мощность, компенсирующая теплопотери с поверхности аппарата в окружающую среду, кВт.

Величину Q_1 рассчитывают по формуле:

$$Q_1 = \Delta W_2 \cdot r \text{ кВт} \quad (12),$$

где: ΔW_2 – количество влаги, испаряемое в единицу времени, кг/с ;

r – удельная теплота парообразования при температуре кипения жидкости, кДж/кг;

Значение величины Q_3 определяют по формуле:

$$Q_3 = \alpha \cdot F (t_{ПОВ.СР}^Ж - t_{ПОВ}) \cdot \tau \text{ кВт} \quad (13),$$

где: α – коэффициент теплоотдачи с поверхности облицовок аппарата в окружающую среду, кВт/(м²К), вычисленный по формулам (7,8) при температуре поверхности облицовки в стационарном режиме.

Тепловой к.п.д. электротеплового аппарата в стационарном режиме:

$$\eta_m = \frac{Q_1}{Q_{\text{ЗАТР}}} \cdot 100 \% \quad (14).$$

Общее количество теплоты $Q_{\text{ЗАТР}}^{\text{э}}$, определенное в ходе эксперимента по показаниям амперметра и вольтметра, в стационарном режиме равно:

$$Q_{\text{ЗАТР}}^{\text{э}} = I \cdot U \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \quad (15).$$

Погрешность эксперимента вычисляется по формуле (10).

Производительность теплового аппарата:

$$\Pi = \frac{V \cdot \varphi \cdot \rho}{T_{\text{ц}}},$$

где: V – объем рабочей камеры, м^3 ;

φ – коэффициент заполнения;

ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$T_{\text{ц}}$ – время технологического цикла (суммарное время загрузки, тепловой обработки и выгрузки), ч.

Удельная металлоемкость:

$$m = \frac{M_1}{V} \text{ кг} \cdot \text{м}^3 \quad (17)$$

Удельная металлоемкость:

$$\Xi = \frac{P}{V} \text{ кВт} \cdot \text{м}^3 \quad (18)$$

Удельный расход энергии:

$$N_V = P / \Pi \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{кг} \quad (19)$$

Методика проведения эксперимента

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, нужно ознакомиться с правилами техники безопасности и освоить необходимый теоретический материал курса.

Перед началом испытаний необходимо измерить начальную температуру окружающей среды, основные геометрические размеры теплового аппарата, массу отдельных элементов конструкции. Массу воды, определяют, взвешивая аппарат вместе с водой и вычитая затем массу конструкции.

Подключив аппарат к сети, измеряют время разогрева, силу тока и напряжения в сети. При закипании воды отключают аппарат и путем взвешивания определяют массу испарившейся влаги.

Вновь подключают аппарат к сети и кипятят, содержимое в течение 5 минут, измеряя температуру кипения жидкости. По истечении указанного времени аппарат взвешивают, определяя массу влаги, испарившейся в стационарном режиме.

Составление отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

- 7) цель работы;
- 8) перечень приборов и материалов;
- 9) описание лабораторного стенда;
- 10) методику проведения эксперимента;
- 11) расчетную часть;
- 12) выводы о проделанной работе.

Расчетная часть

Нестационарный режим (нагрев):

Нагрев продукта до конечной температуры с учетом частичного испарения влаги равен:

$$Q_1 = G_K \cdot C_K \cdot t_B^K - G_H \cdot C_H \cdot t_B^H + \Delta W_1 r$$

где: $G_H = 0,78 \text{ кг}$ – начальная масса воды;

$G_K = 0,8 \text{ кг}$ – конечная масса воды;

$C_H, C_K = 4,19 \text{ кДж/(кгК)}$ – удельная теплоемкость при начальной и конечной температурах воды;

$t_B^K = 97^\circ\text{C}$ – конечная температура воды;

$t_B^H = 25^\circ\text{C}$ – начальная температуры воды;

$\Delta W_1 = 0,2 \text{ кг}$ – количество испарившейся в процессе нагрева жидкости;

r – Удельная теплота парообразования при средней за этот период температуре поверхности жидкости, кДж/кг ;

$$r = 2500 - 2,38 \cdot t_{\text{п.ср}} \quad \text{где}$$

$$t_{\text{п.ср.}} = 0,5(t_B^H + t_B^K) - 2 = 0,5(25 + 97) - 2 = 59, \quad \text{отсюда}$$

$$r = 2500 - 2,38 \cdot t_{\text{п.ср.}} = 2500 - 2,38 \cdot 59 = 2438,62 \quad \text{кДж/кг}, \quad \text{тогда}$$

$$Q_1 = G_K \cdot C_K \cdot t_B^K - G_H \cdot C_H \cdot t_B^H + \Delta W_1 r$$

$$= 0,78 \cdot 4,19 \cdot 97 - 0,8 \cdot 4,19 \cdot 25 + 0,2 \cdot 2438,62 = 720,9 \text{ кВт}$$

Разогрев конструктивных элементов аппарата до установившейся температуры равен:

$$Q_2 = \sum_i^n M_i C_i (t_i^K - t_i^H)$$

где: $M_i = 0,7 \text{ кг}$ – масса i -го элемента конструкции;

$C_i = 1,2 \text{ кДж/(кгК)}$ – удельная теплоемкость материала i -го элемента конструкции,

$t_i^H = 25^\circ\text{C}$ – начальная температура i -го элемента;

$t_i^K = 97^\circ\text{C}$ – конечная температуры i -го элемента;

$$Q_2 = \sum_i^n M_i C_i (t_i^K - t_i^H) = \sum 0,7 \cdot 1,2 (97 - 25) = 60,48 \quad \text{кВт},$$

Компенсация потерь тепла с внешней поверхности аппарата в окружающую среду равна:

$$Q_3 = \alpha_{\text{ср}} \cdot F (t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau_p$$

где: $\alpha_{\text{ср}}$ – средний за период нагрева коэффициент теплоотдачи с поверхности аппарата в окружающую среду, $\text{кВт/(м}^2\text{К)}$;

для цилиндрических облицовок, выполненных из нержавеющей стали или алюминиевых сплавов, при температуре воздуха в помещении:

$$\alpha_{\text{ср}} = [5,2 + 0,06(t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}})] \cdot 10^{-3}$$

где: $F = 0,048 \text{ м}^2$ – площадь наружных облицовок теплового аппарата;

$t_{\text{пов.ср.}}$ – средняя за период нагрева температура поверхностей облицовки, $^\circ\text{C}$.

$\tau_p = 480 \text{ с}$ – время нагрева жидкости до кипения;

$$t_{\text{пов.ср.}} = 0,5(t_{\text{пов}}^H + t_{\text{пов}}^K) = 0,5(25 + 97) = 64 \quad ^\circ\text{C}, \quad \text{тогда}$$

$$\alpha_{\text{ср}} = [5,2 + 0,06(t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}})] \cdot 10^{-3}$$

$$= [5,2 + 0,06(61 - 25)] \cdot 10^{-3} = 0,00736 \quad \text{кВт/(м}^2\text{К)};$$

$$Q_3 = \alpha_{CP} \cdot F (t_{\text{пов.ср.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau_p =$$

$$= 0,00736 \cdot 0,048 (61 - 25) \cdot 480 = 6,1 \quad \text{кВт}$$

Общее количество затраченной теплоты равно:

$$Q_{\text{затр}}^3 = P \cdot \tau_p = I \cdot U \cdot \tau_p \cdot 10^{-3}$$

где: $I = 3,5 \text{ А}$ – сила тока;

$U = 220 \text{ В}$ – напряжение питающей сети.

$$Q_{\text{затр}}^3 = I \cdot U \cdot \tau_p \cdot 10^{-3} = 3,5 \cdot 220 \cdot 480 \cdot 10^{-3} = 369,6 \quad \text{кВт}.$$

Стационарный режим (кипение):

Тепловая мощность, расходуемая на поддержание процесса кипения равна:

$$Q_1 = \Delta W_2 \cdot r$$

где: $\Delta W_2 = 0,1 \text{ кг/с}$ – количество влаги, испаряемое в единицу времени;

$r = 2438,62 \text{ кДж/кг}$ – удельная теплота парообразования при температуре кипения жидкости;

$$Q_1 = \Delta W_2 \cdot r = 0,1 \cdot 2438,62 = 243,86 \quad \text{кВт}$$

Тепловая мощность, компенсирующая теплопотери с поверхности аппарата в окружающую среду равна:

$$Q_3 = \alpha \cdot F (t_{\text{пов.ср.}}^{\text{ж.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau$$

где: $\alpha = 0,00736 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности облицовок аппарата в окружающую среду,

$F = 0,048 \text{ м}^2$ – площадь наружных облицовок теплового аппарата;

$t_{\text{пов.ср.}}^{\text{ж.}} = 97^\circ\text{C}$ – средняя температура поверхности жидкости;

$t_{\text{пов}} = 25^\circ\text{C}$ – температура поверхности;

$\tau_p = 300 \text{ с}$ – время нагрева жидкости до кипения;

$$Q_3 = \alpha \cdot F (t_{\text{пов.ср.}}^{\text{ж.}} - t_{\text{пов}}) \cdot \tau = 0,00736 \cdot 0,048 (97 - 25) \cdot 300 = 7,63 \quad \text{кВт}$$

Производительность теплового аппарата равна:

$$\Pi = \frac{V \cdot \varphi \cdot \rho}{T_{\text{ц}}},$$

где: V – объем рабочей камеры, м^3 ;

$\varphi = 1$ – коэффициент заполнения;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

$T_{\text{ц}} = 0,13 \text{ ч}$ – время технологического цикла (суммарное время загрузки, тепловой обработки и выгрузки),

$$\Pi = \frac{V \cdot \varphi \cdot \rho}{T_{\text{ц}}} = \frac{1 \cdot 0,8}{0,13} = 6,15 \quad \text{кг/ч}.$$

Контрольные вопросы:

1. Приведите классификацию теплообменных аппаратов и изложите их теплофизические и конструктивные отличительные особенности.
2. Назовите известные виды расчета теплообменных аппаратов. В чем заключается основная задача расчета?
3. Приведите уравнения теплопередачи и теплового баланса для теплообменного аппарата.

4. Напишите формулу для расчета теплового потока в рекуперативных теплообменных аппаратах.
5. Что такое средняя разность температур и как она рассчитывается?
6. Приведите закономерности изменения температур в прямоточных и противоточных теплообменных аппаратах и дайте объяснения.
7. Выполните сравнительный анализ прямоточных и противоточных теплообменных аппаратов и дайте объяснения.
8. Изложите основные методы интенсификации процессов теплоотдачи в теплообменных аппаратах.

Список рекомендуемой литературы

Перечень основной литературы

1. Яновский, А.А. Теоретические основы теплотехники / А.А. Яновский ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2017. – 104 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=484962> (дата обращения: 15.10.2019). – Библиогр. в кн. – Текст : электронный.
2. Теплотехника: учебник/[М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и д.р.]; под ред. М.Г. Шатрова. – 2-е изд., испр. – М.: Академия, 2012. – 288 с.: ил. – (Высшее профессиональное образование. Транспорт) (Бакалавриат). – На учебнике гриф: Доп. МО. – Прил.: с.269-282. – Библиогр.: с. 283. – ISBN 978-5-7695-8749-8

Перечень дополнительной литературы:

1. Синявский, Ю.В. Сборник задач по курсу «Теплотехника»: [учеб.пособие] / Ю.В. Синявский. – СПб.: ГИОРД, 2010. – 128 с. : ил., граф., табл. – Прил.: с. 109-126. – Библиогр.: с. 127. – ISBN 978-5-98879-114-0
2. Стоянов, Н.И. Теоретические основы теплотехники: техническая термодинамика и тепломассообмен / Н.И. Стоянов, С.С. Смирнов, А.В. Смирнова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет». – Ставрополь : СКФУ, 2014. – 225 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=457750> (дата обращения: 15.10.2019). – Текст : электронный.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. Электронно-библиотечная система IPRbooks
2. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека on-line»
3. Электронно-библиотечная система Лань

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по организации самостоятельной работы
по дисциплине «ТЕПЛОТЕХНИКА»
для студентов направления подготовки
23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Пятигорск 2026 г.

Содержание

Введение	46
1.Общая характеристика самостоятельной работы студента.....	47
2. План - график выполнения самостоятельной работы.....	48
3.Методические рекомендации по изучению теоретического материала	48
3.1. Вид самостоятельной работы: самостоятельное изучение литературы.....	48
3.2. Вид самостоятельной работы: подготовка к лабораторным занятиям	49
4. Методические указания	49
Список рекомендуемой литературы	49

Введение

Методические указания и задания для выполнения самостоятельной работы студентами по дисциплине «Теплотехника» по направлению подготовки бакалавров: 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Методическое пособие содержит весь необходимый материал для выполнения самостоятельной работы по дисциплине «Теплотехника».

В данном методическом пособии приведены темы и вопросы для самостоятельного изучения.

1.Общая характеристика самостоятельной работы студента

Самостоятельная работа – это вид учебной деятельности, выполняемый учащимся без непосредственного контакта с преподавателем или управляемый преподавателем опосредованно через специальные учебные материалы; неотъемлемое обязательное звено процесса обучения, предусматривающее прежде всего индивидуальную работу учащихся в соответствии с установкой преподавателя или учебника, программы обучения.

На современном этапе самостоятельную работу студента следует разделить на работу с бумажными источниками информации, т.е. учебниками, методическими пособиями, монографиями, журналами и т.д. и электронными источниками информации, т.е. доступ к электронным ресурсам через Интернет.

Сегодня самостоятельную работу студента невозможно представить без использования информационной сети – Интернет. Необходимость использования Интернета возникает не только при подготовке к практическим и семинарским занятиям, но, в большей степени, при написании различных исследовательских и творческих работ. Многие современные монографии, периодические журналы изданы только в электронном виде и с ними можно познакомиться только в Интернете.

Цели и задачи самостоятельной работы: формирование способностей к самостоятельному познанию и обучению, поиску литературы, обобщению, оформлению и представлению полученных результатов, их критическому анализу, поиску новых и неординарных решений, аргументированному отстаиванию своих предложений, умений подготовки выступлений и ведения дискуссий.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Наименование компетенции		
Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности	ИД-1 _{ОПК-1} Основы естественнонаучных и инженерных наук, методов математического анализа и моделирования.	Готовность к контролю технического состояния транспортных средств с использованием средств технического диагностирования
	ИД-2 _{ОПК-1} Применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	Готовность к организации и контролю качества и безопасности процессов сервиса, параметров технологических процессов с учетом требований потребителя

	ИД-3ОПК-1 Навыком применения естественнонаучных и общетехнических знаний, методов математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.	Способен адаптировать и модифицировать специализированное программное обеспечение, методы и алгоритмы систем искусственного интеллекта и машинного обучения в профессиональной деятельности
--	---	---

2. План - график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателям	Всего
3 семестр					
ОПК-1 (ИД-1; ИД-2; ИД-3)	Самостоятельное изучение литературы по темам № 1-8	Собеседование	94,38	11,82	106,2
ОПК-1 (ИД-1; ИД-2; ИД-3)	Подготовка к лабораторным занятиям	Отчёт (письменный)	1,62	0,18	1,8
Итого за 3 семестр			96	12	108
Итого			96	12	108

3. Методические рекомендации по изучению теоретического материала

3.1. Вид самостоятельной работы: самостоятельное изучение литературы

Изучать учебную дисциплину «Теплотехника» рекомендуется по темам, предварительно ознакомившись с содержанием каждой из них в программе дисциплины. При теоретическом изучении дисциплины студент должен пользоваться соответствующей литературой. Примерный перечень литературы приведен в рабочей программе

Для более полного освоения учебного материала студентам читаются лекции по важнейшим разделам и темам учебной дисциплины. На лекциях излагаются и детально рассматриваются наиболее важные вопросы, составляющие теоретический и практический фундамент дисциплины.

Итоговый продукт: конспект лекций

Средства и технологии оценки: Собеседование

Критерии оценивания: Оценка «отлично» выставляется студенту, если в полном объеме изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если достаточно полно изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, недостаточно если полно изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если отсутствуют знания и практические навыки по данной дисциплине.

Темы для самостоятельного изучения:

1. Основные понятия и определения термодинамики, параметры состояния термодинамической системы.
2. Первый и второй законы термодинамики.
3. Термодинамические процессы.
4. Реальные газы, водяной пар, влажный воздух.
5. Термодинамические циклы.
6. Основные понятия и определения теории теплообмена.
7. Теплообменные аппараты и их расчеты.
8. Топливо, горение топлива, применение теплоты.

3.2. Вид самостоятельной работы: подготовка к лабораторным занятиям

Итоговый продукт: отчет по лабораторной работе

Средства и технологии оценки: защита отчета

Критерии оценивания: Оценка «отлично» выставляется студенту, если в полном объеме изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если достаточно полно изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, недостаточно, если полно изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если отсутствуют знания и практические навыки по данной дисциплине

4. Методические указания

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теплотехника», направления подготовки 23.03.03 - Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов.

Список рекомендуемой литературы

Перечень основной литературы

3. Яновский, А.А. Теоретические основы теплотехники / А.А. Яновский ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2017. – 104 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=484962> (дата обращения: 15.10.2019). – Библиогр. в кн. – Текст : электронный.
4. Теплотехника: учебник/[М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и д.р.]; под ред. М.Г. Шатрова. – 2-е изд., испр. – М.: Академия, 2012. -288 с.: ил. – (Высшее профессиональное образование.Транспорт) (Бакалавриат). – На учебнике гриф: Доп. МО. – Прил.: с.269-282. – Библиогр.: с. 283. – ISBN 978-5-7695-8749-8

Перечень дополнительной литературы:

3. Синявский, Ю.В. Сборник задач по курсу «Теплотехника»: [учеб.пособие] / Ю.В. Синявский. – СПб.: ГИОРД, 2010. – 128 с. : ил., граф., табл. – Прил.: с. 109-126. – Библиогр.: с. 127. – ISBN 978-5-98879-114-0
4. Стоянов, Н.И. Теоретические основы теплотехники: техническая термодинамика и тепломассообмен / Н.И. Стоянов, С.С. Смирнов, А.В. Смирнова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет». – Ставрополь : СКФУ, 2014. – 225 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. –

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=457750> (дата обращения: 15.10.2019). – Текст : электронный.

**Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»,
необходимых для освоения дисциплины**

4. Электронно-библиотечная система IPRbooks
5. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека on-line»
6. Электронно-библиотечная система Лань