

Министерство образования и науки Российской Федерации
Вологодский государственный университет

Кафедра управления инновациями и организации производства

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Факультеты: производственного менеджмента и инновационных
технологий, ЗДО

Направления: 23.03.03 (190600.62) - Эксплуатация транспортно-
технологических машин и комплексов
27.03.05 (222000.62) - Инноватика

Вологда
2014

УДК 621.1 (076)

Теплотехника: методические указания к выполнению лабораторных работ - Вологда: ВоГУ, 2014.- 34 с.

Методические указания раскрывают цели и задачи дисциплины, требования к знаниям и умениям студентов после изучения дисциплины. В методических указаниях представлены задания и теоретический материал к выполнению лабораторных работ.

Предназначены для студентов очной, заочной, ускоренной заочной формы обучения, обучающихся по направлениям 23.03.03 (190600.62) - Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов и 27.03.05 (222000.62) – Инноватика.

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГУ

Составитель Фролов А.А., канд.техн. наук, доцент

Рецензент Щекин С.М., канд. техн. наук, доцент каф. ТПММ

Введение

Изучение дисциплины «Теплотехника» служит целям формирования у бакалавров, обучающихся по направлениям: 43.03.01 (100100.62) - Сервис (профиль «Сервис транспортных средств»); 23.03.03 (190600.62) - Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство»), 27.03.05 (222000.62) - Инноватика (профиль «Инновации и управление интеллектуальной собственностью»), компетенций в области:

- основных понятий, законов и методов технической термодинамики;
- термодинамических процессов, протекающих в идеальных газах;
- основных законов при передаче теплоты теплопроводностью, конвекцией и излучением;
- основных законов излучения;
- уравнений теплопередачи для плоских, цилиндрических и сферических стенок;
- тепловых и гидромеханических расчетов теплообменных аппаратов;
- вопросов экологии при использования теплоты.

В результате освоения дисциплины студент должен знать: законы получения и преобразования энергии, методы анализа эффективности использования теплоты, методы расчета термодинамических процессов, циклов двигателей внутреннего сгорания, компрессоров, процессы теплообмена в технологическом оборудовании, основные способы энергосбережения.

Лабораторный практикум направлен на закрепление теоретических знаний и на приобретение практических навыков:

- изучения способов измерения температуры;
- термодинамического расчета одноступенчатого и двухступенчатого компрессора;
- определение коэффициента теплопередачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе;
- теплообмена человека, находящегося в помещении;
- теплоотдачи горизонтального стержня при естественной конвекции.

Лабораторная работа №1

Изучение способов измерения температуры

Цель и содержание работы: получение навыков экспериментального определения температуры тел.

Применяемое оборудование, материалы и инструмент: ртутный термометр, хромель-копелевая термопара, милливольтметр UT33C, манометрический термометр, термометр инфракрасный Testo 831.

Пояснение к работе

Теоретическая часть

Величину температуры нельзя измерить непосредственно, как, например, массу или длину: «единичного количества» теплового состояния нет. Однако определить температуру можно косвенными способами, т.е. по изменению какого-нибудь физического свойства, характеризующего вещество и изменяющегося с температурой однозначно и монотонно.

Температура характеризует тепловое состояние тела и измеряется в градусах. Температура тела изменяется пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Под температурой понимают также степень нагретости тела. Численное значение температуры зависит от выбранной температурной шкалы.

Свойства веществ, которые можно использовать для измерения температуры, называют термометрическими. К ним относятся объем, плотность, длина, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущая сила и т.д. Вещества, которые характеризуются термометрическими свойствами, называют термометрическими.

Температура представляет собой величину переменного уровня. Это значит, что при ее изменении происходит последовательное изменение уровня теплового состояния вещества. Поэтому при определении температуры необходимо знать непрерывный ряд значений термометрического свойства вещества, т. е. надо иметь температурную шкалу.

Под термином «температурная шкала» принято понимать непрерывную совокупность чисел, линейно связанных с числовым значением какого-либо удобно и достаточно точно измеряемого физического свойства, представляющего собой однозначную и монотонную функцию температуры.

Для построения температурной шкалы выбирают две опорные точки, называемые реперами. В качестве репер t_1 и t_2 обычно выбирают температуры фазового равновесия однокомпонентных систем, так как эти температуры могут быть легко воспроизведены. Температурам t_1 и t_2 приписывают произвольные числовые значения.

Расстояние между реперами t_1 и t_2 носит название основного температурного интервала. Его разбивают на N частей. $1/N$ часть основного интервала была названа градусом, который, таким образом, равен $\frac{t_2 - t_1}{N}$.

Для эмпирических шкал, построенных по этому принципу, градус не является единицей измерения, а представляет собой единичный температурный промежуток – масштаб шкалы.

Первые шкалы, построенные по этому принципу, появились в XVIII в. Появление шкалы Фаренгейта датировано 1723 г. В качестве термометрического вещества Фаренгейт вначале брал спирт, затем ртуть. Начальную опорную точку он принимал равной температуре смеси снега с нашатырем или поваренной солью. Температура, при которой замерзала вода, была *32 град*. За *100 град* Фаренгейт принял температуру здорового человека. Тогда температура кипения воды была им получена равной *212 град*. Температурный интервал был разделен на 180 равных частей. Температура по шкале Фаренгейта обозначается $t, ^\circ F$.

В 1736 г. появился термометр со шкалой Реомюра, на которой опорными точками были: *0 град* - температура замерзания воды и *80 град* - температура кипения воды. Температурный интервал был разделен на 80 равных частей. Температура по шкале Реомюра обозначается $t, ^\circ R$.

Температурная шкала Цельсия появилась в 1742 г.

Опорными точками Цельсий выбрал: *0 град* - температура замерзания воды и *100 град* - температура ее кипения. За величину градуса была принята 1/100 интервала между ними. Температура по шкале Цельсия обозначается $t, ^\circ C$.

Если температурные шкалы различаются только видом зависимости $E=f(t)$ и имеют одинаковые реперные точки (температура замерзания и температура кипения воды, как на шкалах Фаренгейта, Реомюра и Цельсия), то они могут быть пересчитаны одна в другую:

$$n^{\circ}C = 0,8n^{\circ}R = (1,8n+32)^{\circ}F. \quad (1)$$

Если температурные шкалы имеют разные реперные точки, то переход от одной шкалы к другой возможен только экспериментально.

Опыты показали, что термометрические свойства газов, в отличие от жидких и твердых тел, меньше зависят от температуры. Поэтому, когда в 80-х годах 19 столетия возникла необходимость в выборе из числа условных шкал одной шкалы, которую можно было бы признать эталонной, исследователи остановились на температурных газовых шкалах и, в частности, на шкале водородного газового термометра. В качестве термометрического свойства было выбрано изменение давления газа при постоянном объеме, так как давление можно измерить с большей точностью.

В 1887 г. Международная комиссия мер и весов приняла в качестве эталона «нормальную» термометрическую стоградусную шкалу водородного термометра с постоянным объемом, начальным давлением *1000 мм рт. ст.* ($133,322 \text{ Н/м}^2$) и двумя основными точками, за одну из них была принята температура тающего льда, за другую – температура насыщенных паров воды, кипящей при давлении *760 мм рт. ст.* ($100\,224,72 \text{ Па}$) на широте 45° .

В 1889 г. эта шкала была признана «нормальной» на международной конференции и тем самым положена в основу всех тепловых измерений. С

«нормальным» водородным термометром были сравнены четыре ртутных, которые и воспроизводили международную водородную шкалу. «Нормальная» шкала водородного термометра охватывала диапазон температур лишь от -25 до +100° С.

Развитие науки и техники требовало не только расширения диапазона температурных измерений, но и увеличения их точности. Вследствие этого в 1927 г. «нормальная» водородная шкала была заменена термодинамической.

Термодинамическая шкала температур была предложена В. Томсоном (лорд Кельвин) в 1848 г., впоследствии она была названа шкалой Кельвина, К. В ее основу положен термодинамический цикл Карно идеальной тепловой машины.

Наименьшая температура была названа Кельвином абсолютным нулем и принята им за начальную постоянную естественную точку абсолютной термодинамической шкалы температур (шкалы Кельвина). Так как $\eta > 1$ противоречит второму закону термодинамики, то температура в абсолютной термодинамической шкале температур не может быть отрицательной.

Градус в термодинамической шкале температур соответствует градусу стоградусной шкалы температур. Числовые значения температур, выраженные в абсолютной термодинамической шкале температур, сопровождаются знаком К (градус Кельвина). Нуль абсолютной шкалы температур соответствует значению $t = -273,15^\circ \text{C}$.

$$T = t + 273,15 \text{ K} \quad (2)$$

Температуру измеряют с помощью устройств, использующих различные термометрические свойства жидкостей, газов и твердых тел. В таблице 1 приведены наиболее распространенные устройства для измерения температуры и практические пределы их применения.

Таблица 1 - Практические пределы применения наиболее распространенных устройств для промышленных измерений температур

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Пределы измерений, °С	
		нижний	верхний
Тепловое расширение	Жидкостные стеклянные термометры	-190	600
Изменение давления	Монометрические термометры	-160	600
Изменение электрического сопротивления	Электрические термометры сопротивления. Полупроводниковые термометры (термисторы, терморезисторы)	-90	180
Термоэлектрические эффекты (термоЭДС)	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

Стеклянные жидкостные термометры (рисунок 1) основаны на свойстве тел изменять свой объем в зависимости от температуры. В качестве термометрического тела (таблица 2) чаще всего применяют ртуть (остается жидкой в температурном интервале $-38,87^{\circ}\text{C}$ до $+356, 58^{\circ}\text{C}$ при нормальном атмосферном давлении) и спирт.

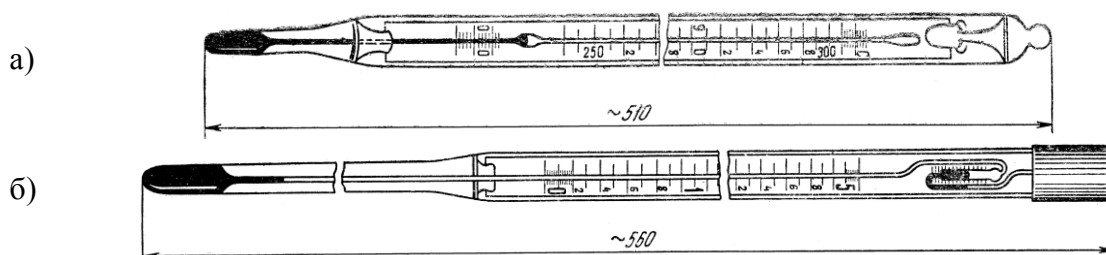


Рисунок 1 - Лабораторный термометр с укороченной шкалой (а) и метастатический термометры (б)

Таблица 2 - Физические параметры термометрических жидкостей

Термометрическая жидкость	Температурный предел применения, $^{\circ}\text{C}$		Средний коэффициент объемного теплового расширения	
	нижний	верхний	истинный	видимый: стекло по ГОСТ 1224
Ртуть	- 35	+ 750 (+ 1200)	0,00018	0,00016
Керосин	- 20	+ 300	0,00095	0,00093
Толуол	- 80	+ 100	0,00107	0,00107
Этиловый спирт	- 80	+ 70	0,00105	0,00103
Петролейный эфир	- 120	+ 25	0,00152	0,00150
Пентан	- 200	+ 20	0,00092	0,00090
Ртутно-таллиевая амальгама (Hg 91,5%, Tl 8,5%)	- 59	+ 20	0,00018	0,00016

Основными источниками погрешностей измерения температур стеклянными жидкостными термометрами являются:

- 1) погрешности показаний термометров при нормальных условиях их работы;
- 2) погрешности, являющиеся следствием отклонения условий измерения от нормальных;
- 3) погрешности, обусловленные дефектами термометра, например, возгонкой термометрической жидкости, разрывами столбика жидкости, наличием пузырьков газа в резервуаре, продольным смещением шкалы;
- 4) погрешности измерения, вносимые наблюдателем, в частности, погрешности отсчета показаний и погрешности определения поправок.

Принцип устройства и действия манометрических термометров основан на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего вещества, например газа, заключенного в герметически замкнутый объем - термосистему термометра.

Термосистема манометрического термометра (рисунок 2) состоит из термобаллона 4, капилляра 3, передаточного механизма 2 и манометрической пружины 1. Термобаллон является теплочувствительным элементом термометра, погружаемым в измеряемую среду. Капилляр соединяет термобаллон с манометрической пружиной, обеспечивая дистанционное измерение температуры.

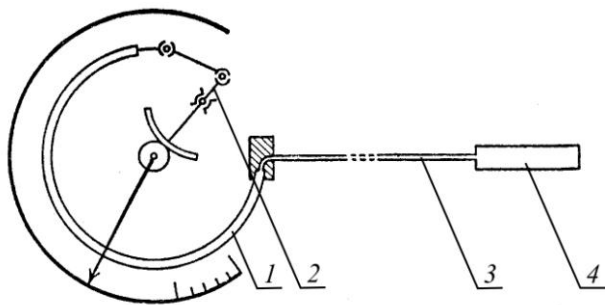


Рисунок 2 - Устройство манометрического термометра

Манометрическая пружина является упругим элементом, который преобразует изменение давления в линейное перемещение ее свободного конца. Свободный конец пружины связан со стрелкой прибора, отклоняющейся в зависимости от изменения давления.

Повышению температуры термобаллона соответствует увеличение давления в термосистеме и, наоборот, при понижении температуры давление в термосистеме уменьшается. Таким образом, каждой измеряемой температуре соответствует одно определенное давление в термосистеме термометра.

Манометрическая пружина, передаточный механизм, стрелка и циферблат, конструктивно объединенные и заключенные в корпус прибора, являются частью манометрического термометра, принципиально не отличающейся от пружинного манометра, используемого для измерения давления.

Основными источниками погрешностей при измерении температуры манометрическими термометрами являются:

- 1) погрешности показаний (или записи) при нормальных условиях работы;
- 2) изменения показаний, возникающие при отступлении от нормальных условий работы (при отклонении температуры капилляра и манометрической пружины от нормальной $+20^{\circ}\text{C}$, отклонении атмосферного давления от нормального, изменении высоты положения термобаллона относительно пружины);
- 3) погрешности отсчета показаний;
- 4) условия теплообмена, нарушающие равенство температур между термобаллоном и измеряемой средой;
- 5) тепловая инерционность термометров.

Принцип действия термометра сопротивления основан на свойстве материалов (металлов, их окислов, солей и т.д.) изменять свое электросопротивление при изменении температуры.

Величину, характеризующую изменение электросопротивления этих материалов при изменении температуры, называют температурным коэффициентом сопротивления и обозначают буквой α . Если R_t - электросопротивление при некоторой температуре t , а R_0 - электросопротивление при 0°C , то температурный коэффициент сопротивления можно определить по формуле

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot t}. \quad (3)$$

Единица измерения температурного коэффициента сопротивления - $град^{-1}$.

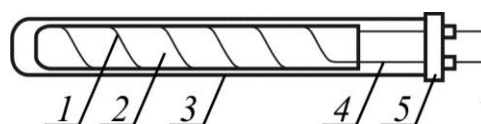
Опыт показывает, что металлы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления, равный для большинства чистых металлов $0,004-0,006 град^{-1}$, что составляет увеличение электросопротивления при повышении температуры на каждый градус приблизительно на 0,4—0,6% от величины электросопротивления при $0^{\circ}C$.

Окиси металлов (полупроводники) имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Это означает, что их сопротивление с повышением температуры уменьшается (в 4-9 раз сильнее, чем у металлов).

Свойство материалов изменять свое электросопротивление при изменении температуры было положено Каллендаром в 1887 г. в основу действия термометров сопротивления.

Принципиальная схема устройства термометра сопротивления представлена на рисунке 3.

Рисунок 3 - Принципиальная схема термометра сопротивления



Чувствительный элемент 1 - чаще всего металлическую проволоку - крепят на каркасе 2 и через токоподводящие провода 4 подсоединяют к головке термометра 5, подводя таким образом термометр сопротивления к измерительному устройству. Защитная оболочка 3 предохраняет чувствительный элемент от воздействия окружающей среды.

В настоящее время используются термометры сопротивления весьма разнообразных конструкций. Свойства материалов, применяемых для изготовления термометров сопротивления, определяют разнообразие их конструкций.

Как выбор материала, так и конструкции зависят от их назначения и тех диапазонов температур, в которых им предстоит работать.

Основные источники погрешностей измерения температуры термометрами сопротивления делятся на три группы:

1) погрешности, зависящие от термометра и соединительной линии (отклонение градуировки от стандартной – у технических термометров, погрешность индивидуальной градуировки – у образцовых, неточность подгонки сопротивления линии, изменение сопротивления линии при колебании температуры окружающей среды);

2) погрешности, зависящие от вторичного прибора (основная и дополнительная погрешности, механическая инерция прибора);

3) погрешности, связанные с условиями применения термометра (неблагоприятные условия теплообмена между термометром и окружающей средой, перегрев чувствительного элемента измерительным током, тепловая инерционность термометра).

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 2 разнородных проводника, составляющих общую электрическую цепь (рисунок 4). Если температуры мест соединений (спаёв) проводников t и t_1 неодинаковы, то возникает термо-ЭДС и по цепи протекает ток. Величина термо-ЭДС тем больше, чем больше разность температур.

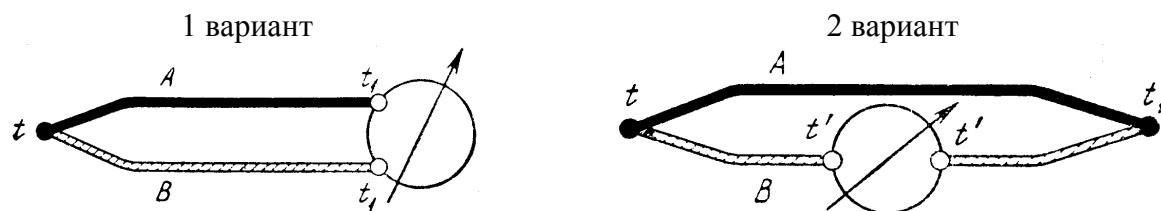


Рисунок 4 - Схема включения измерительного прибора в цепь термопары

Термопары градуируются двумя методами:

- 1) с помощью постоянных точек кипения и затвердевания химически чистых веществ, температуры кипения и затвердевания которых известны,
- 2) методом сравнения с образцовыми приборами (термопарами, термометрами, яркостными пирометрами).

Основные технические характеристики термопар стандартных градуировок приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Основные технические характеристики термопар

Термопара	Градуировка	Химический состав термоэлектродов		Верхний температурный предел применения, °С		Чувствительность, мВ/град	Т.э.д.с. верхнего предела, мВ
		положительного	отрицательного	длительного	кратковременного		
Платинородий-платиновая ТПП	ПП-1	Платинородий (90% Pt, 10% Rh)	Платина (100% Pt).	1300	1600	0,01	16,72
Платинородий-платинородиевая ТПР	ПР 30/6	Платинородий (70% Pt, 30% Rh)	Платинородий (94% Pt, 6% Rh)	1600	1800	0,01	13,927
Хромель-алюмелевая ТХА	ХА	Хромель (89% Ni, 9,8% Cr, 1% Fe, 0,2% Mn)	Алюмель (94% Ni, 2% Al, 2,5% Mn, 1% Si, 0,5% Fe) Копель (55% Си, 45% Ni)	1000	1300	0,04	52,41
Хромель-копелевая ТХК	ХК			600	800	0,08	66,40
Термопара с термоэлектродами из специальных сплавов ТНС	НС	Спецсплав НК	Спецсплав СА	1000	-	0,02	13,39
Медь-константановая	Единой градуировки нет	Медь (100%)	Константан (42% Ni, 58% Си)	400	-	0,015-0,04	20
Вольфрам-молибденовая ТВМ		Вольфрам (~100%)	Молибден (~100%)	1800	-		~20
Вольфрам-рениевая ТВР	ВР 5/20	Сплавы вольфрама с рением (95%W, 5% Re) (80%W, 20%Re)		2200	2500	0,01-0,015	31,45

Основными источниками погрешностей измерения температуры термопарами являются:

- 1) погрешности в определении градуировочной характеристики образцовых и технических нестандартных термопар;
- 2) отклонения градуировочной характеристики стандартных технических термопар от стандартной градуировочной таблицы;
- 3) погрешности от изменений температуры свободных концов термопар;
- 4) термоэлектрическая неоднородность термоэлектродов;
- 5) вредное влияние различных факторов, изменяющее градуировочную характеристику термопар, в том числе действие ионизирующих излучений;
- 6) электропроводность изоляции;
- 7) погрешности, зависящие от условий измерения.

Практическая часть

1. Изучить пределы применения наиболее распространенных устройств для промышленных измерений температур.
2. Изучить основные источники погрешностей измерения температуры.
3. Освоить навыки работы с прибором – термометр инфракрасный Testo 831.
4. Освоить навыки работы с прибором - милливольтметр ВТ-1.
5. Измерить температуру нагревательной поверхности, окружающей среды и воды в колбе с помощью ртутного термометра, хромель-копелевой термопары, манометрического термометра и инфракрасного термометра Testo 831.

Обработка результатов исследований и содержание отчета:

1. Название, цель работы, применяемое оборудование.
2. Зарисовать принципиальные схемы устройств, применяемых для промышленных измерений температур.
3. Построить график функции $T, ^\circ\text{C} = f(t, \text{мин})$ для каждой поверхности.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы:

1. Что называется температурой?
2. Как получены температурные шкалы? (Цельсия, Кельвина, Фаренгейта)?
3. Соотношение между температурными шкалами.
4. Как определить действительную температуру.
5. Что такое термопара?
6. Виды приборов для измерения температуры и принцип их действия.

Лабораторная работа №2

Термодинамический расчёт одноступенчатого и двухступенчатого компрессора

Цель и содержание работы: определение технико-экономических показателей работы одноступенчатого и двухступенчатого компрессора.

Применяемое оборудование, материалы и инструмент: воздушный компрессор «Мидко» мод. М1-10, воздушный компрессор FiniTiger мод. МК 245, комплект измерительный К-506, манометр ОМБ1-160, термометр, хромель-копелевая термопара, милливольтметр UT33C, термометр инфракрасный Testo 831.

Пояснение к работе

Теоретическая часть

Сжатые газы широко используются в различных отраслях техники. Сжатие газов осуществляют в поршневых, центробежных и осевых компрессорах. Несмотря на конструктивное различие компрессоров указанных типов, с термодинамической точки зрения принцип действия их один и тот же.

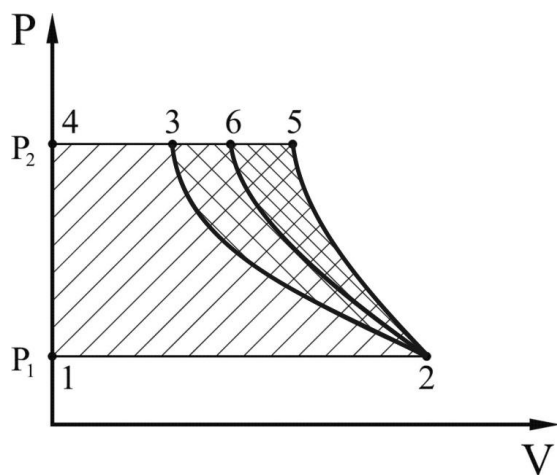


Рисунок 5 - Процесс сжатия газа

Процесс сжатия газа от давления P_1 до давления P_2 может осуществляться по-разному, например, по изотерме 2-3 или по адиабате 2-5, а в реальных компрессорах процесс сжатия описывается политропой 2-6, как показано на рисунке 5.

Как видно из рисунка, наименьшая техническая работа и наименьшие затраты мощности двигателя требуются при изотермическом сжатии 2-3. Однако тепло, которое отводится системой охлаждения, пропорционально производительности компрессора и повышается с увеличением отношения давления P_2/P_1 . Поэтому высокопроизводительные компрессоры, которые должны обеспечивать высокую степень сжатия, практически невозможно снабдить такой системой охлаждения, которая обеспечивала бы изотермическое сжатие. В связи с этим в таких компрессорах используют многоступенчатое сжатие с охлаждением после каждой ступени.

На рисунке 6 представлена принципиальная схема одноступенчатого компрессора, на рисунке 7 - двухступенчатого, а на рисунке 8 представлена теоретическая диаграмма работы компрессора.

Принцип работы двухступенчатого компрессора заключается в следующем. В цилиндр 1 всасывается воздух с параметрами P_1, T_0 окружающей среды (линия 9-1). По линии 1-2 происходит сжатие газа до давления P_2 , при этом его температура повышается до значения T_1 . В изобарном процессе 2-3 проис-

ходит охлаждение газа в теплообменнике 3 до температуры T_2 . В политропном процессе 3-4 происходит сжатие газа в цилиндре 2 от давления P_2 до P_3 .

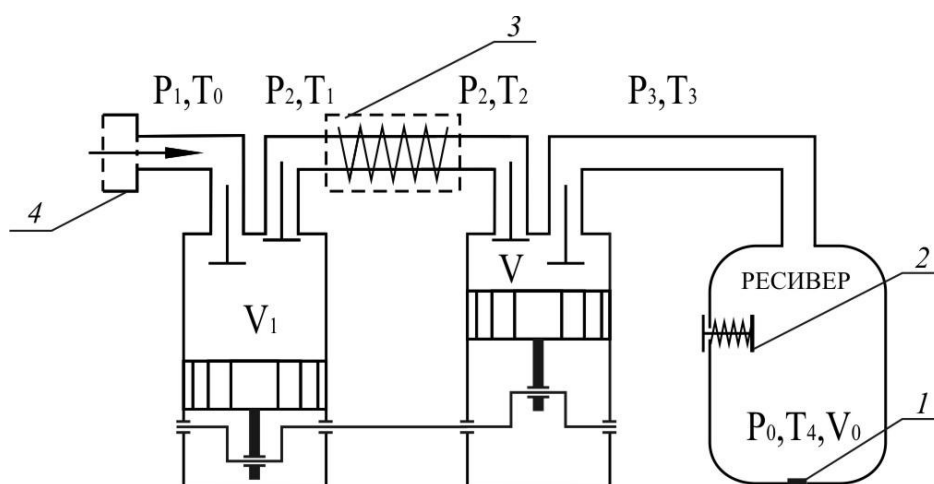
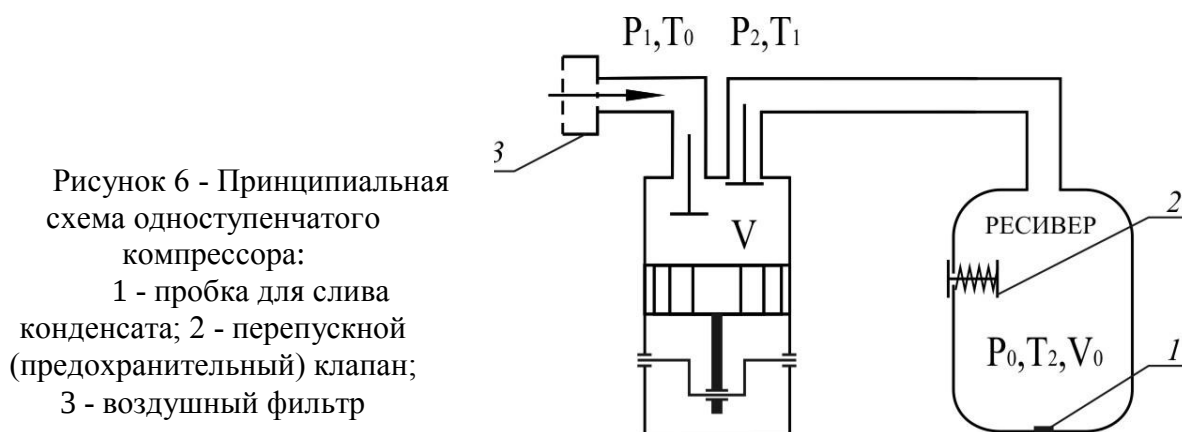


Рисунок 7 - Принципиальная схема двухступенчатого компрессора:
 1 - пробка для слива конденсата; 2 - перепускной (предохранительный) клапан;
 3- теплообменник; 4 - воздушный фильтр

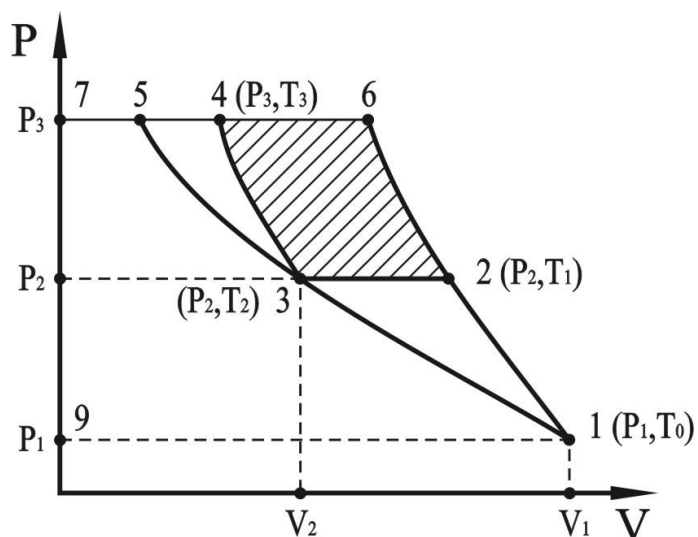


Рисунок 8 - Теоретическая диаграмма работы компрессора

С параметрами точки 4 газ подается в систему. Работа, затраченная на сжатие газа в двухступенчатом компрессоре, равняется площади фигуры, ограниченной линиями 1-2-3-4-7-9. Экономия работы при сжатии газа по сравнению с одноступенчатым сжатием равна площади заштрихованной фигуры. Линией 1-3-5 показан изотермический процесс одноступенчатого сжатия, который на практике технически не осуществим.

Описание установки

1. Работа проводится на одноступенчатом воздушном компрессоре FiniTiger, модели МК 245, представленном на рисунке 9.

Экспериментально измеряются: потребляемая компрессором электрическая мощность, температура воздуха t_1 после 1-го цилиндра и температура воздуха t_2 в воздушном ресивере. Величины температур регистрируются термопарами или инфракрасным термометром Testo 831. Давление воздуха измеряется прибором, установленным на компрессоре.



Рисунок 9 - Одноступенчатый воздушный компрессор FiniTiger модели МК 245

2. Работа проводится на двухступенчатом воздушном компрессоре «Мидко» модели М1-10. Экспериментально измеряются: потребляемая компрессором электрическая мощность, температура воздуха t_1 после 1-го цилиндра, температура воздуха t_2 перед 2-м цилиндром, температура воздуха t_3 после 2-го цилиндра и температура воздуха t_4 в воздушном ресивере. Величины температур регистрируются термопарами или инфракрасным термометром Testo 831. Давление воздуха измеряется прибором ОМБ1- 160.

Практическая часть

На измерительном комплекте К506 переключатели тока и напряжения ставятся в одно из рабочих положений, переключатель диапазона напряжений – в позицию 375 (250). Включая одновременно секундомер, нажать кнопку «пуск» компрессора. Во время работы компрессора снять показания I и U по шкале К506. После автоматического отключения компрессора данные внести в таблицу 4 для одноступенчатого и а таблицу 5 для двухступенчатого компрессора.

Таблица 4 - Таблица измеренных и расчетных данных для одноступенчатого компрессора

I, А	U, В	W=IU, Вт	Температура, °С			Время работы компрессора, τ, с	Давление в ресивере, Р ₀ , Па
			t ₀ возд.	t ₁ после 1 цил.	t ₂ ресив.		

Таблица 5 - Таблица измеренных и расчетных данных для двухступенчатого компрессора

I, А	U, В	W=IU, Вт	Температура, °С					Время работы компрессора, τ, с	Давление в ресивере, Р ₀ , Па
			t ₀ возд.	t ₁ после 1 цикл.	t ₂ пе- ред 2 цикл.	t ₃ по- сле 2 цикл.	t ₄ ресив.		

Обработка результатов исследований

1. Для одноступенчатого компрессора

1.1. Определить степень сжатия цилиндра ε_1 по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (4)$$

где $T_0 = t_0 + 273$, К;

$T_1 = t_1 + 273$, К;

$T_2 = t_2 + 273$, К;

n - показатель политропы сжатия компрессора в цилиндре, $n=1,25$.

1.2. Расчет 1-й ступени компрессора

Давление на выходе из 1-го цилиндра определяется по формуле:

$$P_2 = P_1 \varepsilon_1, \text{ Па}, \quad (5)$$

где P_1 - давление воздуха в комнате, $P_1 = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$.

Работа за 1-й цикл:

$$L_1 = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 [(\varepsilon_1)^{(n-1)/n} - 1], \text{ Дж}, \quad (6)$$

где V_1 - рабочий объем цилиндра, м³.

$$V_1 = \frac{\pi D_1^2 H_1}{4}, \text{ м}^3, \quad (7)$$

где $D_1 = 46 \text{ мм}$ - диаметр цилиндра;

$H_1 = 45 \text{ мм}$ - ход поршня.

Мощность 1-й ступени:

$$N_1 = L_1 n_0, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где $n_0 = 47,5 \text{ с}^{-1}$ - скорость вращения компрессора.

1.3. Коэффициент полезного действия компрессора:

$$\eta = \frac{N_1}{W}, \quad (9)$$

где W - потребляемая электрическая мощность двигателя компрессора,
 $W = I U$, Вт.

1.4. Производительность компрессора теоретическая:

$$G_m = \frac{\pi D_1^2 H_1 n_0}{4}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (10)$$

1.5. Производительность компрессора реальная:

$$G_h = \frac{V_0}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (11)$$

где $V_0 = 24$ л;

τ - время работы компрессора (см. таблицу 4).

2. Для двухступенчатого компрессора

2.1. Определить степень сжатия ε_1 и ε_2 цилиндров по формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{P_3}{P_2} = \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (13)$$

где $T_0 = t_0 + 273$, К;

$T_1 = t_1 + 273$, К;

$T_2 = t_2 + 273$, К;

$T_3 = t_3 + 273$, К;

n - показатель политропы сжатия компрессора в цилиндрах, $n=1,25$.

2.2. Расчет 1-й ступени компрессора

Давление на выходе из 1-го цилиндра определяется по формуле:

$$P_2 = P_1 \varepsilon_1, \text{ Па}, \quad (14)$$

где P_1 - давление воздуха в комнате, $P_1 = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$.

Работа за 1-й цикл:

$$L_1 = \frac{n}{n-1} P_1 V_1 \left[(\varepsilon_1)^{(n-1)/n} - 1 \right], \text{ Дж}, \quad (15)$$

где V_1 - рабочий объем цилиндра, м^3 .

$$V_1 = \frac{\pi D_1^2 H_1}{4}, \text{ м}^3, \quad (16)$$

где $D_1 = 110$ мм - диаметр цилиндра;
 $H_1 = 88$ мм - ход поршня.

Мощность 1-й ступени:

$$N_1 = L_1 n_0, \text{ Вт}, \quad (17)$$

где $n_0 = 21 \text{ с}^{-1}$ - скорость вращения компрессора.

2.3. Расчет 2-й ступени компрессора:

Давление воздуха на выходе из 2-го цилиндра определяется по формуле:

$$P_3 = P_2 \cdot \varepsilon_2, \text{ Па}, \quad (18)$$

Работа за 2-й цикл:

$$L_2 = \frac{n}{n-1} P_2 V_2 \left[(\varepsilon_2)^{(n-1)/n} - 1 \right], \text{ Дж}, \quad (19)$$

где V_2 - рабочий объем цилиндра, м^3 .

$$V_2 = \frac{\pi D_2^2 H_2}{4}, \text{ м}^3, \quad (20)$$

где $D_2 = 60$ мм - диаметр цилиндра;
 $H_2 = 88$ мм - ход поршня.

Мощность 2-й ступени:

$$N_2 = L_2 n_0, \text{ Вт}, \quad (21)$$

где $n_0 = 21 \text{ с}^{-1}$ - скорость вращения компрессора.

2.4. Коэффициент полезного действия компрессора:

$$\eta = \frac{N_1 + N_2}{W}, \quad (22)$$

где W - потребляемая электрическая мощность двигателя компрессора,
 $W = I U \text{ Вт}$.

2.5. Производительность компрессора теоретическая:

$$G_m = \frac{\pi D_2^2 H n_0}{4}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (23)$$

2.6. Производительность компрессора реальная:

$$G_h = \frac{V_0}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (24)$$

где $V_0=500$ л;

τ - время работы компрессора (см. таблицу 5).

Обработка результатов исследований и содержание отчета:

1. Название, цель работы, применяемое оборудование.
2. Схемы и диаграмма работы компрессора.
3. Таблица исходных данных и результаты расчета.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы:

1. Виды компрессоров.
2. Что такое степень сжатия?
3. Как может проходить процесс сжатия газа от давления P_1 до P_2 ?
4. Для чего нужен ресивер?
5. Каково назначение перепускного (предохранительного) клапана?
6. Каково назначение теплообменника в двухступенчатом компрессоре?

Лабораторная работа №3

Определение коэффициента теплопередачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе

Цель и содержание работы: опытное определение значения коэффициента теплопередачи при конденсации подвижного насыщенного водяного пара на внешней поверхности горизонтальной трубы и сравнение его с теоретическим.

Применяемое оборудование, материалы и инструмент: установка "Аквадистиллятор ДЭ-4", вольтметр, амперметр, термометр, мерные емкости объемом 0,4 и 3,0 л., хромель-копелевая термопара, милливольтметр UT33C, термометр инфракрасный Testo 831.

Пояснение к работе

Теоретическая часть

Теплообмен при конденсации паров жидкости представляет собой сложное явление, связанное с одновременным переносом теплоты, массы вещества при изменении фазового состояния. Для возникновения жидкой фазы из паровой (конденсации жидкости) необходимо наличие либо зоны, либо поверхности с температурой, меньшей, чем температура насыщения пара при заданном давлении.

В начальный момент соприкосновения пара с холодной поверхностью последняя покрывается слоем жидкости, который в зависимости от физико-химических свойств конденсируемого вещества и поверхности либо растет и уплотняется, либо разрывается на большое количество капелек. В дальнейшем идет рост капелек и образование новых. В первом случае имеет место пленочная конденсация, а во втором – капельная.

Капельная конденсация возможна лишь в том случае, если конденсат не смачивает поверхность охлаждения. При конденсации же чистого пара смачивающей жидкости на чистой поверхности всегда получается сплошная пленка.

Явление теплообмена при конденсации чистого подвижного пара на стенке условно можно разделить на ряд последовательных этапов:

- подвод пара к стенке за счет молекулярного переноса;
- собственно процесс конденсации, происходящий на стенке;
- теплоотвод в стенку со стороны пленки конденсата.

Основное влияние на теплоотдачу при конденсации оказывает термическое сопротивление пленки конденсата вследствие низкой теплопроводности всех неметаллических жидкостей. Отвод теплоты через пленку конденсата зависит от температурного напора, характера движения пленки, физических свойств и толщины пленки.

При пленочной конденсации на горизонтальной трубе зависимость коэффициента теплоотдачи от конденсата к трубе определяется соотношением:

$$\bar{\alpha}_{конд} = 0,95 \frac{\lambda'(Re')^{-1/3}}{\delta_{gv}} \text{ при } Re' < 40, \quad (25)$$

где Re' - число Рейнольдса, характеризующее течение пленки.

Коэффициент теплоотдачи со стороны охлаждающей воды можно рассчитать по формуле Нуссельта-Крауссольтца:

$$\bar{\alpha}_{воды} = 0,023 \frac{\lambda}{l} Pr^{0,4} Re^{0,8} \quad (26)$$

где $Pr = \nu/a$ - число Прандтля, характеризующее теплоноситель (жидкость);

ν - кинематический коэффициент вязкости теплоносителя;

Re - число Рейнольдса, характеризующее течение охлаждающей жидкости;

a - коэффициент температуропроводности.

Зная параметры охлаждающей системы, можно определить коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи.

Описание установки

Определение коэффициента теплопередачи при конденсации водяного пара производится на промышленной установке "Аквадистиллятор ДЭ-4", представленной на рисунке 10.

Принцип действия аппарата основан на конденсации отсепарированного пара. Аквадистиллятор состоит из основания 1, испарителя 2, кожуха 3, элек-

ронагревателя 4, датчика уровня жидкости 5, патрубка 6, наружной камеры 7, внутренней камеры 8, конденсатора 9, ниппеля питания 10, сливной трубки 11, ниппеля дистиллята 12, уравнивателя 13, ниппеля 14, сливного крана 15.

Испаритель 2 посредством патрубка 6 соединен с конденсатором 10, состоящим из двух самостоятельных камер, внутренней 8 и наружной 7, вмонтированных одна в другую. Между камерами во время работы аппарата непрерывно протекает водопроводная вода, охлаждающая внутреннюю камеру 8. В испарителе вода нагревается электронагревателями до кипения. Образующийся пар поступает во внутреннюю камеру 9, конденсируется и вытекает в виде дистиллята через ниппель 12.

В начале работы водопроводная вода, непрерывно поступающая через ниппель 10, заполняет конденсатор 9 и по сливной трубке 11 через уравнитель 13 заполняет испаритель до установленного уровня. По мере выкипания вода будет поступать в испаритель только частично, основная же ее часть, проходя через конденсатор, будет сливаться по сливной трубке в уравнитель и далее через ниппель 14 в канализацию. Уравнитель предназначен для постоянного поддержания необходимого уровня воды в испарителе.

Аппарат снабжен автоматическим устройством – датчиком уровня жидкости 5, предохраняющим электронагреватели от перегорания в случае понижения уровня воды ниже допустимого.

Чтобы предотвратить повышение давления в испарителе, в стенку конденсатора впаяна трубка, через которую выходит небольшой избыток пара.

Температура охлаждающей жидкости на входе и выходе из рабочего участка измеряется термопарами ТХК 2 и 1 соответственно.

Количество охлаждающей жидкости и конденсата измеряется объемными способами.

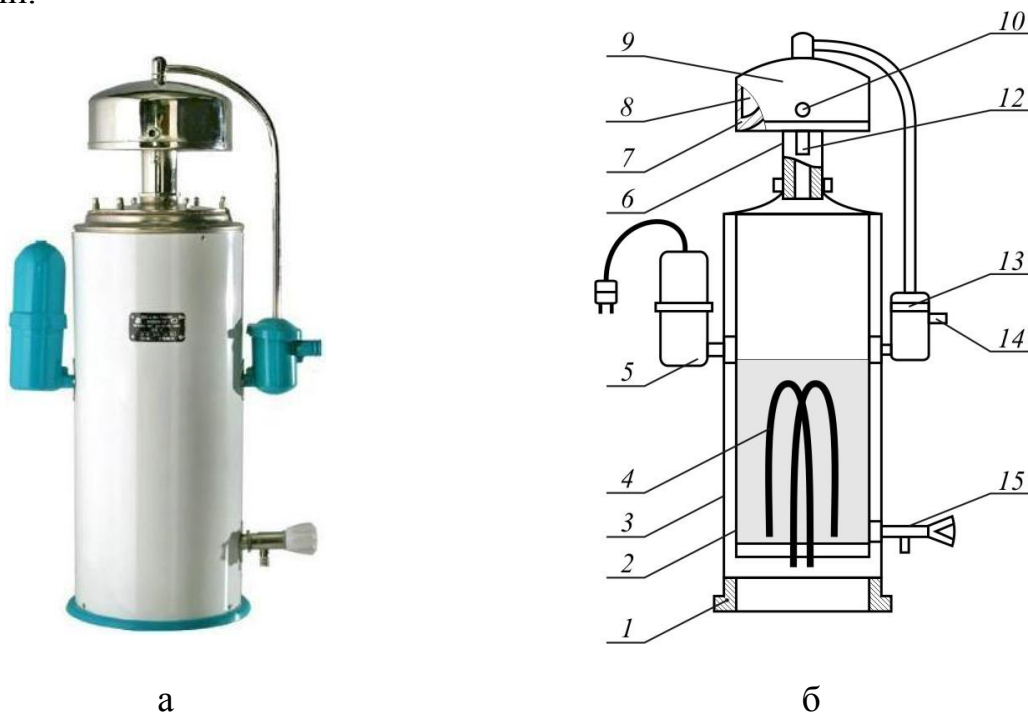


Рисунок 10 - Аквадистиллятор ДЭ-4:
а - внешний вид прибора; б - принципиальная схема

Порядок проведения работы

Открыть вентиль подачи охлаждающей воды в холодильник установки.

Включить установку в сеть с напряжением 220 В. После начала кипения воды и вытекания сконденсированной жидкости (при установившемся режиме системы) измерить расход охлаждающей жидкости $G_{ж}$, кг/с, и производительность установки $G_{дис}$, кг/с.

При работающей установке измерить нагрев охлаждающей жидкости:

$$\Delta t = t_2 - t_1, ^\circ\text{C}. \quad (27)$$

Измерение температуры производится хромель - копелевыми термопарами (ТХК) при помощи милливольтметра.

Записать показания приборов, а также количество собранного конденсата в журнал наблюдений, представленный в таблице 6.

Таблица 6 - Журнал наблюдений

Температура воздуха,	Охлаждающая вода		Температура пара	Температура холодной воды	Производительность установки	U, В	I, А
$^\circ\text{C}$	Расход $G_{ж}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$\Delta t = t_2 - t_1$	$t_{п}$, $^\circ\text{C}$	$t_x = (t_1 + t_2)/2$, $^\circ\text{C}$	$G_{дис}$, $\text{м}^3/\text{с}$		

Для перевода температур из мВ в $^\circ\text{C}$ необходимо пользоваться таблицей 7 и к полученному значению добавить температуру воздуха в комнате.

По окончании опытов выключить управляющие тумблеры установки "Аквадистиллятор ДЭ-4" и отключить электропитание из сети. Отключить подачу охлаждающей жидкости.

Обработка результатов измерений

Определить коэффициент теплоотдачи со стороны охлаждающей воды по формуле:

$$\bar{\alpha}_{\text{воды}} = 0,023 \frac{\lambda}{l} \text{Pr}^{0,4} \text{Re}^{0,8}, \quad (28)$$

где $\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}$ - число Рейнольдса;

$v = \frac{4 \cdot G_{ж}}{\pi \cdot d^2}$ - скорость движения жидкости по трубе, м/с;

$d = 8$ мм - внутренний диаметр трубы;

Pr - число Прандтля;

ν - коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

λ - коэффициент теплопроводности воды, $\text{Вт}/\text{м}^\circ\text{C}$;

$l = d$ - характерный линейный размер, м.

Pr , ν , λ находятся по таблице 7 согласно средней температуре воды:

$$t_x = t_{\theta} = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (29)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации $\bar{\alpha}_{конд}$ используем метод последовательных приближений.

Задаем коэффициент теплоотдачи $K_0 = 0,5 \bar{\alpha}_{воды}$, тогда

$$q = K_0(t_n - t_b), \text{ Вт/м}^2\text{С}, \quad (30)$$

где $t_n = 100^\circ\text{С}$ - температура пара.

Таблица 7 - Физические свойства воды на линии насыщения

t , $^\circ\text{С}$	$p \cdot 10^5$, Па	ρ , кг/м ³	i , кДж/ кг	C_p , кДж/ (кг· $^\circ\text{С}$)	λ , Вт/ (м· $^\circ\text{С}$)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /сек	$\mu \cdot 10^{-6}$, Па·сек	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /сек	$\beta \cdot 10^{-4}$, 1/К	$\sigma \cdot 10^{-4}$, кг/м	Pr
0	1,013	999,9	0	4,212	0,560	1,32	1788	1,789	-0,63	75,64	13,5
10	1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	1,38	1305	1,306	+0,70	74,16	9,45
20	1,013	998,2	83,91	4,183	0,597	1,43	1004	1,006	1,82	72,69	7,03
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	1,47	801,5	0,805	3,21	71,22	5,45
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	1,51	653,3	0,659	3,87	69,65	4,36
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	1,55	549,4	0,556	4,49	67,69	3,59
60	1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	1,58	469,9	0,478	5,11	66,22	3,03
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	1,61	406,1	0,415	5,70	64,35	2,58
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	1,63	355,1	0,365	6,32	62,59	2,23
90	1,013	965,3	377,0	4,208	0,676	1,65	314,9	0,326	6,95	60,72	1,97
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	1,68	282,5	0,295	7,52	58,86	1,75
110	1,430	951,0	461,4	4,233	0,685	1,70	259,0	0,272	8,08	56,90	1,60
120	1,980	943,1	503,7	4,250	0,686	1,71	237,4	0,252	8,64	54,84	1,47
130	2,700	934,8	546,4	4,266	0,686	1,72	217,8	0,233	9,19	52,88	1,35
140	3,610	926,1	589,1	4,287	0,885	1,72	201,1	0,217	9,72	50,72	1,26
150	4,760	917,0	632,2	4,313	0,681	1,73	186,4	0,203	10,3	48,66	1,17
160	6,180	907,4	675,4	4,346	0,681	1,73	173,6	0,191	10,7	46,60	1,10
170	7,920	987,3	719,3	4,380	0,676	1,72	162,8	0,181	10,3	44,34	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	1,72	153,0	0,173	11,9	42,28	1,03
190	12,55	876,0	807,8	4,459	0,664	1,72	144,2	0,165	12,6	40,02	0,965

Для конденсата температуры t_n по таблице 7 находим величины Pr' , ν' , λ' , μ' , где λ' - коэффициент теплопроводности конденсата;

μ' - динамический коэффициент вязкости, Па·с;

ν' - кинематический коэффициент вязкости, м²/с;

Pr - число Прандтля;

$r = 2,2 \cdot 10^6$ Дж/кг - теплота парообразования воды.

Оценим в первом приближении число Рейнольдса пленки конденсата на поверхности трубы по формуле:

$$Re' = \frac{\pi \cdot D \cdot q}{r \cdot \mu'}, \quad (31)$$

где, $D=10$ мм - внешний диаметр трубы.

Вычислим масштаб гравитационно-вязкого взаимодействия:

$$\delta_{g\nu} = \frac{(\nu')^{2/3}}{g^{1/3}}, \quad (32)$$

где $g = 9,81$ м²/с - ускорение свободного падения.

Находим коэффициент теплоотдачи конденсата.

$$\bar{\alpha}_{\text{конд}} = 0,95 \frac{\lambda'}{\delta_{g\nu}} (Re')^{-1/3}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}. \quad (33)$$

Проверим коэффициент теплопередачи:

$$K_1 = \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_{\text{воды}}} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{\text{конд}}} + \frac{\delta_{\text{тр}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right)^{-1}, \quad (34)$$

где $\delta_{\text{тр}}=1$ мм - толщина трубы;

$\lambda_{\text{тр}}=380$ Вт/м·°C - теплопроводность трубы.

Сравниваем K_0 и K_1 . Если они отличаются, задаем для K_0 другое значение и производим расчеты по формулам 30-34 заново.

Подсчитываем мощность нагревателя по формуле:

$$Q_H = U I, \text{ Вт}. \quad (35)$$

Подсчитываем мощность по количеству конденсата:

$$Q_K = G_{\text{дист}} \rho_v r, \quad (36)$$

где $\rho_v = 1000$ кг/м³ - плотность воды;

$r = 2,2 \cdot 10^6$ Дж/кг - теплота парообразования воды.

Вычисляем коэффициент теплопередачи на опыте по формуле:

$$K_{\text{оп}} = \frac{Q_{\text{ж}}}{(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) \cdot S_{\text{тр}}} = \frac{G_{\text{ж}} \cdot \rho_v \cdot (t_2 - t_1) \cdot C_p}{(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) \cdot S_{\text{тр}}}, \quad (37)$$

где $S_{\text{тр}} = 1,05 \cdot 10^{-2}$ - площадь поверхности трубы, м².

Обработка результатов исследований и содержание отчета:

1. Название, цель работы, применяемое оборудование.
2. Таблица исходных данных и результаты расчета.
3. Схема установки "Аквадистиллятор ДЭ-4".
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы:

1. Парообразование жидкости; сущность процессов кипения и испарения жидкости.
2. Понятия: жидкость на линии насыщения, влажный насыщенный пар, сухой насыщенный пар, перегретый пар.
3. Удельная теплота парообразования жидкости.
4. Степень сухости, степень влажности пара.
5. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара, их значение.

Лабораторная работа №4

Теплообмен человека, находящегося в помещении

Цель и содержание работы: опытное определение величины лучисто-конвективного теплообмена человека, находящегося в помещении лаборатории; проверка первого условия комфортности.

Применяемое оборудование, материалы и инструмент: хромель-копелевая термопара, милливольтметр UT33C, термометр инфракрасный Testo 831.

Пояснение к работе

Теоретическая часть

Тепловая обстановка в помещении

В помещениях, где пребывают люди, необходимо поддерживать определенный микроклимат. Значение параметров микроклимата следует принимать в зависимости от назначения помещения, категории работ и периода года, исходя из требований комфорта для находящихся в помещении людей и нормального протекания технологического процесса.

Нарушение теплового баланса человека ухудшает его самочувствие и трудоспособность. Установлено, что тепловое самочувствие заметно влияет на производительность труда, число несчастных случаев резко возрастает при отклонении температуры от нормальной на 3 - 5 °С.

Самочувствие и работоспособность человека зависят от работы физиологической системы терморегуляции организма, которая нормально функционирует при температуре около 36,6 °С. Для поддержания постоянной температуры организм человека непрерывно вырабатывает тепло, которое отдается окружающей среде.

Тепловыделение человека зависит от его возраста, веса, деятельности. В спокойном состоянии взрослый человек отдает окружающей среде около 120 Вт, при легкой работе – до 250 Вт, при тяжелой – до 500 Вт. Большая доля тепла передается лучеиспусканием (около 55 %), меньшая – конвекцией и испарением.

Интенсивность отдачи тепла человеком зависит от тепловой обстановки в помещении, которая определяется следующими показателями: температурой t_B , подвижностью V_B , относительной влажностью воздуха в помещении, температурами поверхностей, обращенных в помещение. Значения для различных поверхностей неодинаковы. Поэтому вводится понятие "средняя температура" этих поверхностей или "радиационная температура" - t_R . Приблизительно величину t_R допускается определять осредненной по площади отдельных поверхностей F :

$$t_R = \Sigma(t_{в.п.} \cdot f_{в.п.}) / f_{в.п.}, ^\circ\text{C} \quad (38)$$

где $t_{в.п.}$, $f_{в.п.}$ - температуры и площади внутренних поверхностей ограждающих конструкций помещения (не включается площадь нагревательных приборов), $^\circ\text{C}$, м²;

Интенсивность лучисто-конвективного теплообмена характеризуется результирующей температурой помещения t_n , принимаемой для обычных помещений с небольшой подвижностью воздуха (0,1 - 0,15 м/с):

$$t_n = (t_B + t_R) / 2, ^\circ\text{C} \quad (39)$$

Примерная связь между температурой внутреннего воздуха в помещении t_B и радиационной температурой t_R представлена на рисунке 10.

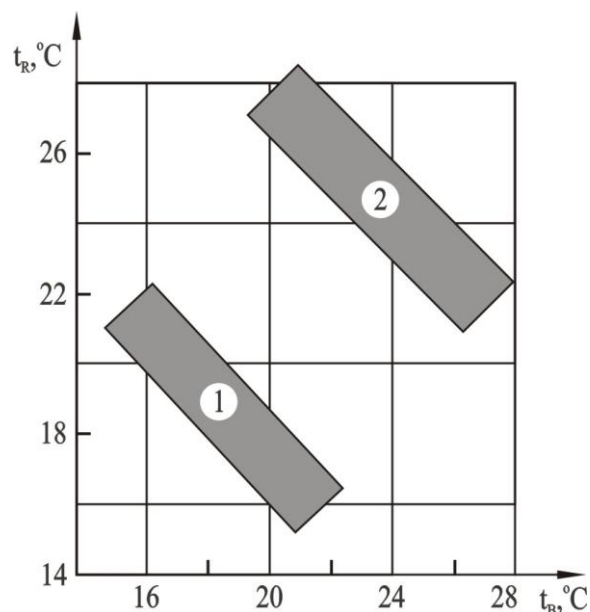


Рисунок 11 - Соотношение между внутренней t_B и радиационной t_R температурами воздуха в помещении:
1- для холодного времени года;
2- для теплого времени года

Температурную обстановку в помещении определяют двумя условиями комфортности.

Первое условие комфортности соответствует режиму, когда человек, находящийся в центре обслуживаемой зоны, не испытывает ни перегрева, ни переохлаждения.

Обычно для спокойного состояния человека $t_b = 21 - 23$ °С, при легкой работе $t_b = 19 - 21$ °С, при тяжелой $t_b = 14 - 16$ °С. Для холодного периода года первое условие характеризуется формулой:

$$t_R = 1,57t_n - 0,57 t_b \pm 1,5, ^\circ\text{C} \quad (40)$$

Второе условие комфортности определяет допустимые температуры нагретых или охлажденных поверхностей. Так, например, температура поверхности потолка и стен (выше 1 м от пола) во избежание недопустимого радиационного воздействия на голову человека может быть рассчитана по следующим формулам:

$$t_{\text{нагр}} \leq 19,2 + 8,7/\varphi \text{ и } t_{\text{охл}} \geq 23 - 5/\varphi, ^\circ\text{C} \quad (41)$$

где φ - коэффициент облученности, безразмерная величина, зависящая от расположения и размеров поверхностей (доля лучистого потока, падающего на поверхность, от всей лучистой эмиссии поверхности). Если в помещении одна такая поверхность, то $\varphi = 1$, в остальных случаях $\varphi < 1$.

Второе условие комфортности ограничивает интенсивность теплообмена при положении человека около нагретых и охлажденных поверхностей. Определяющей величиной в этом случае является интенсивность лучистого теплообмена (радиационный баланс на наиболее невыгодно расположенной и наиболее чувствительной к излучению части поверхности тела человека). К радиационному нагреву наиболее чувствительной оказывается поверхность головы. Радиационный баланс должен быть таким, чтобы любая элементарная площадка на поверхности головы отдавала излучением окружающим поверхностям не менее $11,63 \text{ Вт/м}^2$ и не более 80 Вт/м^2 .

Величина лучисто-конвективного потока от человека в помещении определяется соотношением:

$$Q_{\text{ч}}^{\text{л+к}} = \alpha_{\text{л}} (t_{\text{ч}} - t_{\text{R}}) F_{\text{ч}}^{\text{л}} + \alpha_{\text{к}} (t_{\text{ч}} - t_{\text{в}}) F_{\text{ч}}^{\text{к}}, \text{ Вт} \quad (42)$$

где $t_{\text{в}}$, t_{R} - температура воздуха помещения в рабочей зоне и радиационная температура помещения, °С;

$F_{\text{ч}}^{\text{л}}$, $F_{\text{ч}}^{\text{к}}$ - площади теплоотдающих поверхностей тела человека для лучистого и конвективного теплообмена: $F_{\text{ч}}^{\text{л}} = 1,7 \text{ м}^2$, $F_{\text{ч}}^{\text{к}} = 1,9 \text{ м}^2$;

$\alpha_{\text{л}}$, $\alpha_{\text{к}}$ - средние по поверхности коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена: $\alpha_{\text{л}} = 5,12 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, $\alpha_{\text{к}} = 2,33 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$;

$t_{\text{ч}}$ - средняя температура поверхности одетого человека, °С, (для зимнего режима $t_{\text{ч}} = 25$ °С).

Расчетная величина $t_{\text{в}}$ определяется назначением помещения и должна обеспечивать хорошее самочувствие человека. За расчетную величину $t_{\text{в}}$ принимают температуру воздуха на высоте 1,5 м от пола и не ближе 1 м от наружной стены.

Описание устройства прибора "термометр инфракрасный Testo 831"

Testo 831 - компактный ИК-термометр, представленный на рисунке 12, предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхности. Основные технические данные прибора приведены в таблице 8. Прибор не является медицинским диагностическим оборудованием.



Рисунок 12 - Внешний вид и основные органы управления прибора "термометр инфракрасный Testo 831"

Таблица 8 - Технические данные прибора "термометр инфракрасный Testo 831"

Измеряемые температурные шкалы	°C / °F
Диапазон ИК-измерений	От -30 до +210 °C
Разрешение	0,5 °C
Точность	±1.5 °C или 1,5% измер. (от -20 до +210°C);(при 23°C). ±2 °C или 2,0% измер. (от -30 до -20,1°C);+/- 1 цифра.
Коэффициент излучения/эмиссии	от 0,2 до 1,0 регулируемый
Частота измерения	0,5сек.
Оптика (90%)	30:1 (на расстоянии 1,0 м от объекта измерения)
Тип лазера	2-х точечный
Рабочая температура	от -20 до +50°C
Температура трансп./хранения	от -40 до +70°C
Питание	Батарейка 9В (типа "Крона")
Ресурс батарейки	15 часов
Размеры (ДхВхШ)	190 x 75 x 38 мм
Соответствие стандарту CE	89/336/EEC

Измерение температуры ИК-термометром осуществляется следующим образом:

Для включения прибора нажмите кнопку или "ИК-измерения". Кратковременно загорятся все сегменты дисплея. Прибор перейдет в режим ИК-измерений (горит символ I^{IR}). После каждого нажатия кнопки, включается подсветка дисплея на 15 сек.

Удерживайте кнопку I^{IR} или "ИК-измерения". Направьте прибор на объект измерения: лазер указывает на верхнюю и нижнюю границы пятна измерения. На дисплее отображаются текущие показания температуры (2 измерения в секунду). Для завершения измерения необходимо отпустить кнопку. Загорается надпись HOLD - отображается последнее измеренное значение.

Для выключения: нажмите и держите ∇ , пока не погаснет дисплей. Прибор так же автоматически выключится через 1 минуту после последнего нажатия на любую кнопку.

Порядок выполнения работы

1. При помощи прибора "термометр инфракрасный Testo 831" измерить температуры поверхностей помещения (внутренних поверхностей стен, пола, потолка) в точках, указанных на рисунке 13.
2. Результаты измерений занести в таблицу 9.
3. Определить среднее значение температуры для каждой поверхности.
4. Определить среднюю радиационную температуру помещения t_R по формуле (38).
5. В нескольких точках при помощи прибора измерить температуру поверхности одетого человека. Определить среднее значение $t_{\text{ч}}$, °С.
6. Определить температуру воздуха внутри помещения $t_{\text{в}}$, °С.
7. Зная t_R , $t_{\text{в.п.}}$, $t_{\text{в}}$, $t_{\text{ч}}$, по формуле (41) определить величину лучисто-конвективного потока от человека.
8. При полученных значениях $t_{\text{в}}$, t_R по рисунку 11 проверить выполнение первого условия комфортности для помещения лаборатории.

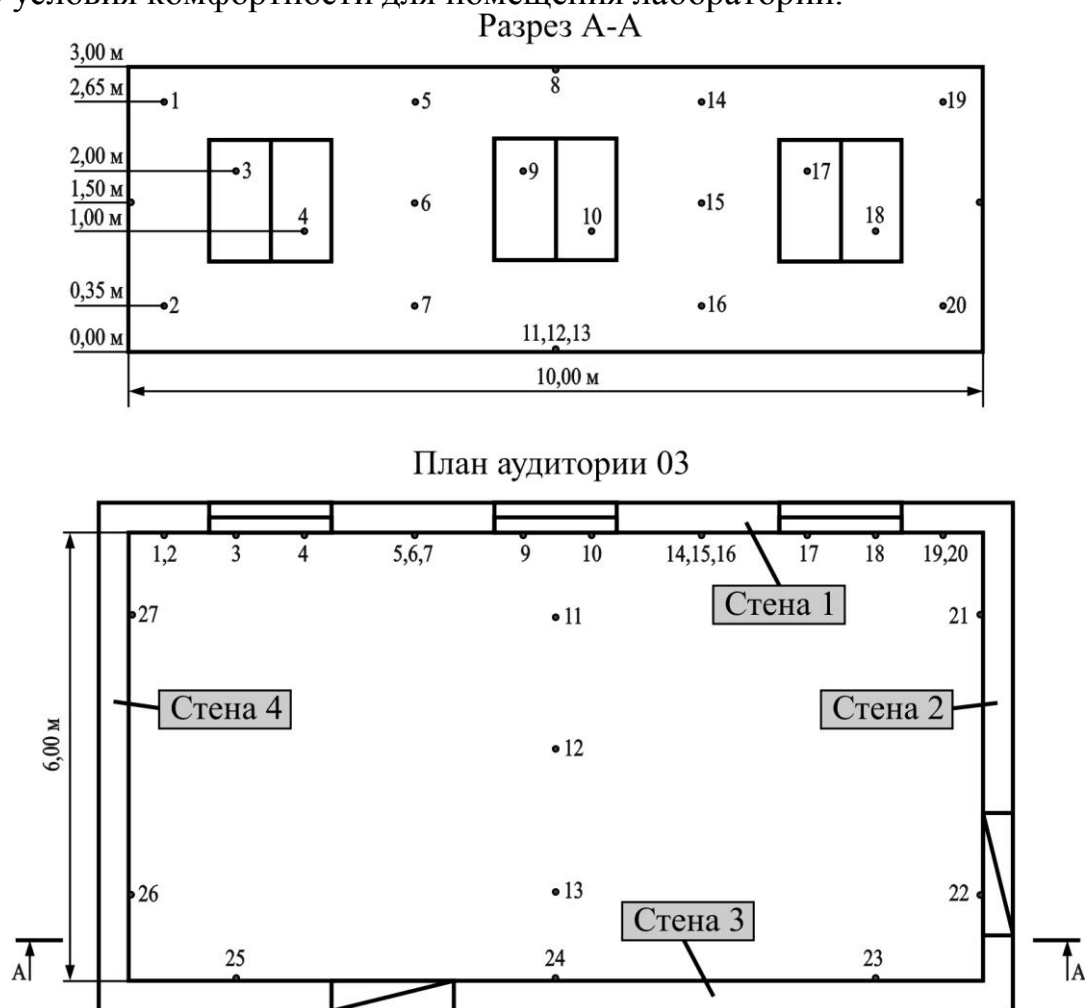


Рисунок 13 - Схема лаборатории 03

Таблица 9 - Результаты измерения температуры

Наименование поверхности	Площадь поверхности	№ точек замеров	Результат измерения температуры, °С
Стена 1	30	1-2, 5-7, 14-16, 19-20	
Стена 1, окно 1		3,4	
Стена 1, окно 2		9,10	
Стена 1, окно 3		17,18	
Стена 2	18	21,22	
Стена 3	30	23-25	
Стена 4	18	26,27	
Пол	60	11-13	
Потолок	60	8	

Обработка результатов исследований и содержание отчета:

1. Название, цель работы, применяемое оборудование.
2. Измерения, сведенные в таблицу 9.
3. Результаты расчетов, график $t_R = f(t_b)$ с нанесением точки, определяющей комфортные (некомфортные) условия в помещении лаборатории.
4. Вывод относительно комфортности температурной обстановки в помещении лаборатории.

Контрольные вопросы:

1. Что показывает радиационная температура?
2. Сформулируйте первое и второе условие комфортности.
3. От чего зависит тепловыделение человека?
4. Почему необходимо знать $t_{в.п.}$ и t_b ?
5. Какая часть человеческого тела наиболее чувствительна к радиационному нагреву?
6. Какова температура поверхности одетого человека?

Лабораторная работа №5

Теплоотдача горизонтального стержня при естественной конвекции

Цель и содержание работы: экспериментальное определение распределения температур по длине стержня и переданного количества теплоты; сравнение их с теоретическими.

Применяемое оборудование, материалы и инструмент: установка стыковой сварки, стержень с термопарами, милливольтметр UT33С, термометр инфракрасный Testo 831, штангенциркуль.

Пояснение к работе

Теоретическая часть

В технике широко используется обогревание поверхности нагрева с целью интенсификации теплопередачи, например, в радиоэлектронике, в быстровра-

щающихся механизмах, в авиации и т.д. В этом случае требуется рассчитать само оребрение, т.е. определить наиболее рациональную форму и размеры ребра. При этом в задачу расчета входит распределение температуры по ребру, количество снимаемой теплоты, масса и стоимость оребренной поверхности нагрева. В одном случае требуется, чтобы габариты теплообменника были минимальными, в другом – чтобы минимальной была масса, в третьем – чтобы использование материала было эффективным и т.д. В полном объеме такая задача может быть решена только на основе эксперимента. Вместе с этим имеются и математические решения задачи. Правда, эти решения очень сложны и возможны лишь при целом ряде упрощающих предпосылок.

Рассмотрим эти закономерности для стержня постоянной толщины l и длины L , представленном на рисунке 14, при горизонтальном его положении.

Стержень находится в среде с температурой t_0 . К торцу стержня подводится постоянное количество теплоты, и поэтому температура стержня изменяется лишь по его длине. В основании стержня температура равна t_1 . Коэффициент теплопроводности металла λ известен.

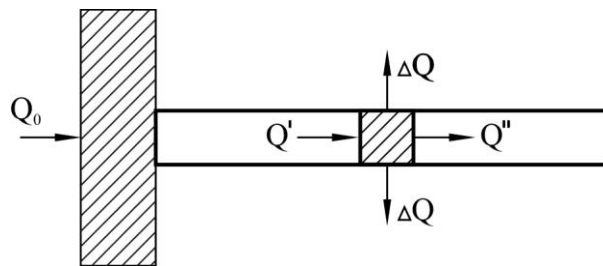


Рисунок 14 - Стержень в горизонтальном положении

Математическое решение задачи приводит к формуле распределения температуры:

$$t = \frac{2(t_1 - t_2)}{e^{mL} + e^{-mL}} + t_0, \quad (43)$$

где $m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot P}{\lambda \cdot f}};$

P - периметр стержня, мм;

f - площадь поперечного сечения, мм²;

t_0 - температура окружающей среды, °С.

Для нагрева одного торца стержня и подвода теплоты к нему используется машина стыковой контактной сварки, представленная на рисунке 15. Если к паре электродов 2 прижать деталь 1, то при пропускании через нее тока она нагревается до определенной температуры. Перпендикулярно к детали приварен исследуемый стержень с термопарами, показанный на рисунке 16.

Подводимый тепловой поток равен мощности электрического тока $Q = UI$, рассчитанной по силе тока и напряжению в первичной цепи трансформатора машины стыковой сварки.

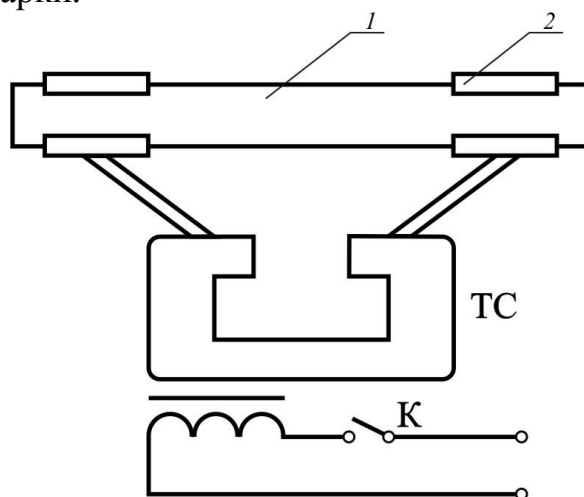


Рисунок 15 - Схема установки для стыковой сварки: 1- деталь; 2- зажимы

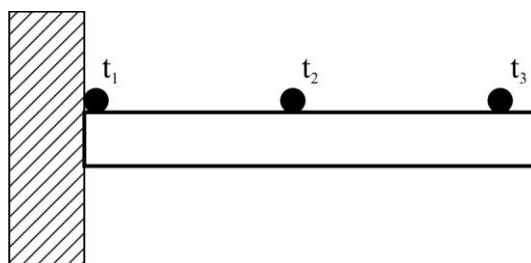


Рисунок 16 - Схема расположения термопар

Порядок проведения работы

Установить исследуемый стержень в зажимах машины стыковой сварки.

Включить машину стыковой сварки в сеть. Выбрать режим работы машины. Включить кнопку сварочного аппарата.

После прогрева стержня и установления стационарного режима теплоотвода снять показания амперметра, вольтметра, термопар и занести в таблицу 10. Замеры провести в двух режимах нагрева.

Таблица 10 - Результаты измерений

№ опыта	U, В	I, А	Температура стержня, °С			t ₀ , °С
			t ₁	t ₂	t ₃	
1						
2						

Обработка результатов измерений

Тепловой поток, подводимый к стержню:

$$Q = I U, \text{ Вт.} \quad (44)$$

Средний коэффициент теплоотдачи стержня:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{S \cdot \Delta t} = \frac{K \cdot Q}{S \left[\frac{(t_1 + t_2 + t_3)}{3} - t_0 \right]}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (45)$$

где $K=1/27,4$ - коэффициент теплопередачи к стержню;

$S=\pi d L$ - площадь поверхности стержня, мм².

Температура в конце стержня:

$$t = \frac{2(t_1 - t_0)}{e^{mL} + e^{-mL}} + t_0, \quad (46)$$

$$\text{где } m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot P}{\lambda \cdot f}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda \cdot r}};$$

r - радиус стержня, мм;

$\lambda = 40 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Температура в середине стержня:

$$t_c = \frac{(t_1 - t_0) \cdot [e^{m(x-L)} + e^{-m(x-L)}]}{e^{mL} + e^{-mL}}, \quad (47)$$

где $x = L/2$.

Обработка результатов исследований и содержание отчета:

1. Название, цель работы, применяемое оборудование.
2. Схема устройства экспериментальной установки.
3. Измерения, сведенные в таблицу 10.
4. Результаты расчета.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы:

1. Зачем в технике используется ребрение поверхности нагрева?
2. Что показывает коэффициент теплопроводности металла λ ?
3. Что понимается под стационарным режимом теплоотвода?

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Перед началом работы в лаборатории студенты проходят инструктаж по технике безопасности, что должно быть отражено в журнале лаборатории.
2. Включение лабораторных установок производится только под наблюдением преподавателя или лаборанта; студентам запрещается в процессе работы открывать или закрывать вентили, включать или выключать электронагревательные элементы, приводы насоса и вентилятора.
3. Запрещается повышать параметры на установках: давления и температуры за пределы, указанные в паспортах на лабораторное оборудование.
4. Запрещается прикасаться руками к неизолированным трубопроводам с греющей средой или к токоведущим элементам установок.
5. При обнаружении неисправности в работе установки необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю и отключить установку.
6. После окончания работы установка должна быть отключена от электропитания, а после окончания работ в лаборатории необходимо произвести отключение установок на общем щите; закрыть все вентили и краны на трубопроводах.

Библиографический список

1. Высокоэффективные процессы обработки материалов: учеб. пособие: в 3 ч. Ч. III. / Шичков А.Н., Солтус В.С., Сигов Н.А. и др. - Вологда: ВоПИ, 1996. - 138с.
2. Сайт теплотехника. Большая техническая библиотека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teplokot.ru/>.
3. Все для теплотехника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.teplota.org.ua/>.
4. Профмедтехника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.profmt.ru/catalog/>.
5. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков . – 3-е изд., стер. . – М. : МЭИ , 2007 . – 458 с.
6. Теплоэнергетика и теплотехника : справоч. серия : в 4 кн. . Кн. 1 : Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы: справочник / под общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорина . – 4-е изд., стер. . – М. : МЭИ , 2007 . – 527 с.
7. Теплоэнергетика и теплотехника : справоч. серия : в 4 кн. . Кн. 2 : Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорина . – 4-е изд., стер. . – М. : МЭИ , 2007 . – 561 с.
8. Теплоэнергетика и теплотехника : справоч. серия : в 4 кн. . Кн. 4 : Промышленная теплоэнергетика и теплотехника / под общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорина . – 4-е изд., стер. . – М. : МЭИ , 2007 . – 630 с.
9. Теплотехника : учеб. для вузов по специальностям направления подгот. "Эксплуатация наземн. трансп. и трансп. оборудования" и по направлениям подгот. бакалавров "Эксплуатация трансп. средств" и "Эксплуатация трансп.-технол. машин и комплексов" / [М. Г. Шатров, И. Е. Иванов, С. А. Пришвин и др.]; под ред. М. Г. Шатрова . – 3-е изд., стер. . – М. : Академия , 2013 . – 287 с.
10. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для бакалавров по техническим направлениям и специальностям / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк . - 2-е изд. перераб. и доп. . - М. : Юрайт , 2013 . - 566 с.

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа №1. Изучение способов измерения температуры	4
Лабораторная работа № 2. Термодинамический расчёт одноступенчатого и двухступенчатого компрессора	12
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента теплопередачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе	18
Лабораторная работа № 4. Теплообмен человека, находящегося в помещении	24
Лабораторная работа №5. Теплоотдача горизонтального стержня при естественной конвекции	29
Библиографический список	34

Подписано в печать 6.03.2014.	Усл. печ. л. 2,25	Тираж	экз.
Печать офсетная.	Бумага писчая.	Заказ №	_____.

Отпечатано: РИО ВоГУ, г. Вологда, ул. Ленина, 15