

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Обработка материалов давлением»

О. М. Валицкая

РАСЧЕТЫ И КОНСТРУКЦИИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-36 01 05
«Машины и технология обработки
материалов давлением»**

Гомель 2009

УДК 621.7(075.8)
ББК 34.651я73
В15

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 12.02.2008 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Машины и технология литейного производства»
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Л. Е. Ровин*

Валицкая, О. М.
В15 Расчеты и конструкции нагревательных устройств : лаборатор. практикум по од-
ноим. дисциплине для студентов специальности 1-36 01 05 «Машины и технология обра-
ботки материалов давлением» / О. М. Валицкая. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. –
56 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное
место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа:
<http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Лабораторный практикум включает шесть лабораторных работ. Студенты могут ознако-
миться с устройством и освоить навыки работы с прибором КСП4 и нагревательной электриче-
ской печью СНОЛ 1,6x2,5x1/11, освоить современную методику поверки термопар. В приложениях
даны таблицы номинальных статистических характеристик термоэлектрических преобразователей,
графики для расчета температуры центра и поверхности цилиндрических или времени нагрева об-
разцов при нагреве в печи с постоянной температурой.

Для студентов специальности 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов
давлением».

УДК 621.7(075.8)
ББК 34.651я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

КОНТРОЛЬ РЕЖИМА НАГРЕВА ПЕЧИ ПРИБОРОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КСП4.

Цель работы: ознакомиться с назначением, техническими данными, устройством и принципом работы автоматического потенциометра, эксплуатационным уходом, требованиями безопасности.

Освоить работу прибора в комплекте с термопарой при измерении и автоматическом регулировании температуры печной среды.

Теоретические сведения.

Прибор автоматический следящего уравнивания КСП4 предназначен для измерения напряжения постоянного тока.

По метрологическим свойствам прибор является средством измерения. По устойчивости к воздействию температуры и влажности окружающего воздуха и атмосферного давления прибор соответствует группе 3 по ГОСТ 2297-90. По защищенности от воздействия окружающей среды и устойчивости к механическим воздействиям приборы выпускают обыкновенного исполнения по ГОСТ12997-84. Они предназначены для работы в условиях УХЛ по ГОСТ15150-69.

Прибор 12-ти канальный. Работает в комплекте с термоэлектрическими преобразователями ТХК, ТХА, ТПП, ТПР, ТВР или телескопами радиационными пирометрами суммарного излучения. В приборах применяют универсальную диаграммную ленту с равномерной сеткой по ГОСТ-75, поэтому для считывания записываемого параметра рекомендуется пользоваться шкалами прибора: нижней, числа отсчета которой совпадают с числами отсчета диаграммной ленты и верхней, числа которой совпадают с числами отсчета в единицах измеряемой величины. Регистрация на диаграммной ленте производится циклично отпечатываемыми точками, регистрация шестичетная. Пределы шкал потенциометров КСП4, предназначенных для работы в комплекте с источником напряжения постоянного тока приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Пределы шкалы, мВ		Цена деления, мВ
Начальное значение шкалы	Конечное значение шкалы	
0	10	0,1
-10	10	0,2
0	20	0,2
0	50	0,5
0	100	1
-100	100	2

Период (цикл) регистрации в многоканальных приборах (время между следующими один за другим отпечатками), с 4+- 0,4 или 12+- 1,2. Предел допускаемой основной погрешности показаний $\pm 0,5\%$ от нормирующего значения.

Номинальная средняя скорость перемещения диаграммной ленты, мм/ч: 60; 180; 600; 1800; 2400; 7200.

Устройство и принцип работы.

В основу работы прибора положен компенсационный метод измерения, состоящий в уравнивании измеряемого напряжения, т.е. неизвестной термоэлектрической силы E_x , создаваемой термопарой или радиационным пирометром, известной разностью потенциалов, снимаемой с калиброванного реохорда. Измерительной схемой потенциометров служит компенсационно-мостовая схема (рис.1).

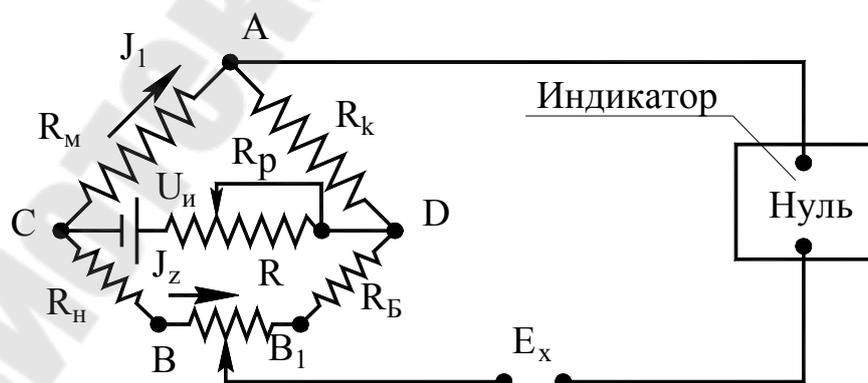


Рис. 1. Компенсационно-мостовая схема.

Компенсационно-мостовая схема состоит из трех плеч с сопротивлениями R_n , R_m , R_k и из плеча, содержащего калиброванный реохорд и сопротивление R_b . К вершинам моста С и D последовательно с регулируемым сопротивлением R_p подключен источник питания U_1 . Напряжение на других двух вершинах моста А и B_1 зависит от положения движка на реохорде. Для сравнения неизвестного напряжения E_x с напряжением на реохорде последовательно с E_x включен чувствительный нуль-индикатор. Если измеряемое напряжение E_x не равно напряжению в точках А и B_1 моста, то можно перемещением движка реохорда найти положение равновесия схемы, т.е. отсутствие отклонения указателя нуль-индикатора. При другом значении неизвестного напряжения можно найти другое положение движка реохорда, при котором будет отсутствовать отклонение указателя индикатора.

Таким образом, положение движка реохорда определяет значение измеряемого напряжения.

В автоматических потенциометрах компенсация осуществляется с помощью электромеханической следящей системы: напряжение рассогласования между измеряемым напряжением E_x и компенсационной эдс (падением напряжения на реохорде) используется в качестве управляющего сигнала для исполнительного механизма (реверсивного двигателя), перемещающего движок калиброванного реохорда. Роль нуль-индикатора в электронных автоматических потенциометрах выполняет электронный усилитель, управляющий работой реверсивного двигателя. Принципиальная электрическая схема прибора приведена на рис. 2.

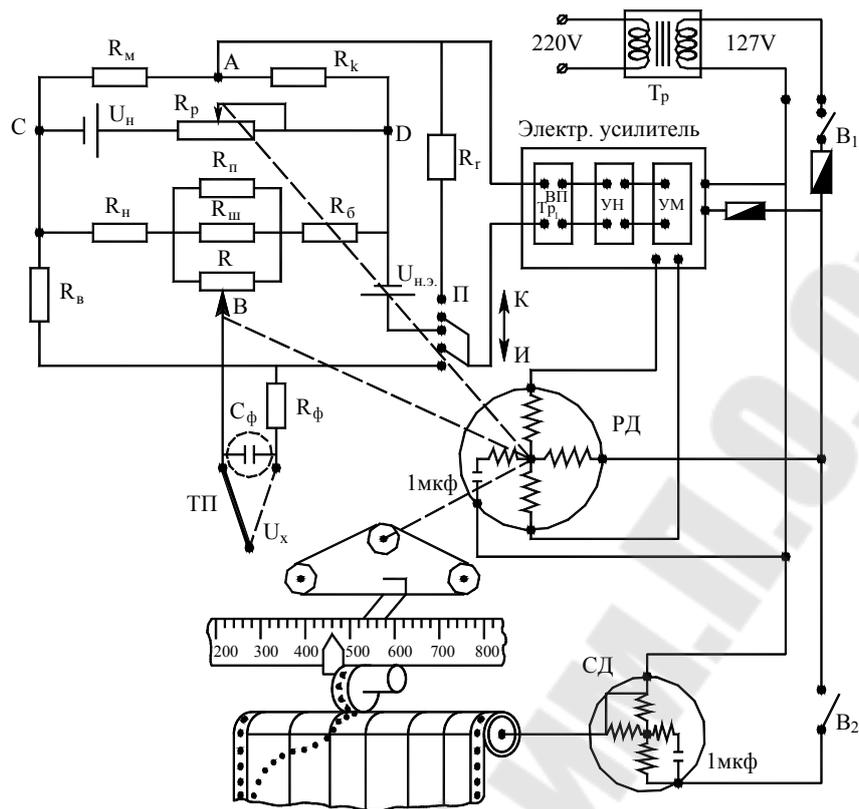


Рис. 2. Принципиальная схема автоматического потенциометра.

Схема состоит из сопротивлений, имеющих следующие назначения: R - сопротивление калиброванного реохорда; R_{III} - сопротивление шунта реохорда, служащее для приведения реохорда к стандартной величине R_{II} - сопротивление, служащее для изменения предела измерения при градуировке прибора; R_H - сопротивление, служащее для изменения начального значения шкалы прибора при градуировке; R_B - сопротивление, служащее для изменения конечного значения шкалы прибора при градуировке его; R_M - сопротивление, служащее для автоматической компенсации температуры свободных концов термопары; R_K - сопротивление, служащее для установки рабочего тока потенциометра по нормальному элементу; R_P - сопротивление регулировочного реостата, служащего для регулировки рабочего тока в схеме; R_T - сопротивление, шунтирующее вход усилителя при установке рабочего тока; R_B - сопротивление сигнализации обрыва цепи; R_ϕ , C_ϕ - сопротивление и емкость фильтра, служащего для уменьшения действия помех; U_x - измеряемое напряжение (т.э.д.с.); $U_{и}$ - напряжение рабочего источника питания измерительной схемы; $U_{н.э.}$ - напряжение нормального элемента; Π - переключатель для переключения усилителя с измерения (положение И) на контроль (положение К) рабочего тока;

ВП- вибрационный преобразователь; УН- усилитель напряжения; УМ- усилитель мощности; ТП-термопара; T_{p1} -измерительный трансформатор; T_p - силовой (понижающий) трансформатор; РД -реверсивный двигатель; СД- синхронный двигатель; РУ-регистрирующее устройство; B_1 -выключатель тока питания прибора (общий); B_2 -выключатель СД.

Компенсирующее напряжение снимается с диагонали АВ неравновешенного моста. Этот мост получает питание в диагонали СД от сухого элемента с напряжением $U_{и}$ либо от стабилизированного источника питания. При неизменных сопротивлении моста и постоянном $U_{и}$ разность потенциалов U_{AB} зависит только от положения движка реохорда R. При измерениях переключатель П находится в положении И и в схеме сравнивается измеряемое напряжение U_x (т.э.д.с., создаваемое термопарой) с напряжением U_{AB} . Если они различаются между собой, т.е. если $U_x \neq U_{AB}$, то к электронному усилителю поступает сигнал рассогласования $U_x - U_{AB}$ (в случае, если $U_x > U_{AB}$) в виде некоторого напряжения постоянного тока, в котором оно преобразуется вибропреобразователем ВП в напряжение переменного тока. Полученное переменное напряжение незначительной величины усиливается в электронном усилителе по напряжению и мощности. Усиленный сигнал поступает на одну из обмоток статора реверсивного двигателя РД. К другой обмотке, расположенной под углом 90^0 относительно первой, подведен ток от сети переменного тока стандартной частоты напряжением чаще всего 127В. Последовательно со второй обмоткой включен конденсатор, создающий сдвиг фазы в обмотках двигателя на 90^0 , в результате чего происходит вращение ротора двигателя. Направление вращения ротора двигателя зависит от знака рассогласования. Ось реверсивного двигателя при помощи гибкой нити связана с движком реохорда, с регистрирующей системой. Вращение двигателя будет происходить до тех пор, пока движок реохорда не займет положение, при котором напряжение рассогласования $U_x - U_{AB}$ не станет равным нулю, т.е. $U_x - U_{AB} = 0$.

Таким образом, положение движка реохорда и связанных с ним регистрирующих устройств, однозначно определяют величину т.э.д.с. и, следовательно, величину измеряемой температуры.

Прибор построен по блочному принципу (рис.3,4). Все блоки и элементы прибора смонтированы на выдвижном кронштейне. Кронштейн может выдвигаться из корпуса. В рабочем положении кронштейн целиком утапливается в корпусе прибора и фиксируется с помощью защелки.

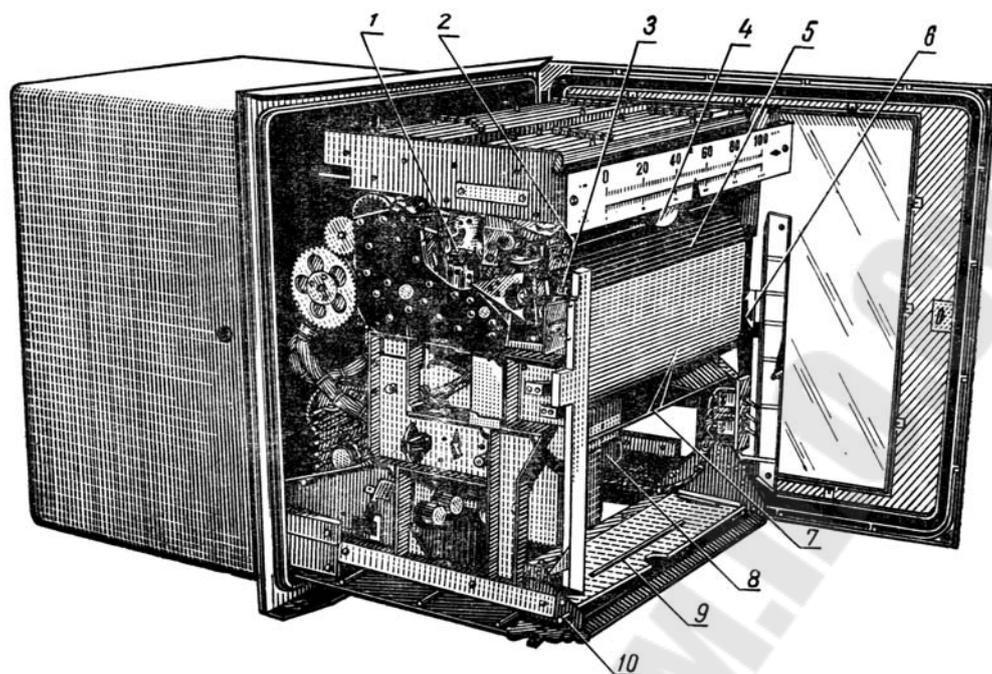


Рис. 3. Прибор с выдвинутым кронштейном. 1 – рычаг переключения периодов регистрации; 2 – указатель скорости диаграммной ленты; 3 – рычаг переключения скоростей; 4 – показывающее и регистрирующее устройство; 5 – барабан с пуклевками; 6 – защелка щитка; 7 – направляющая ось диаграммной ленты; 8 – конденсаторы двигателей синхронного и реверсивного; 9 – основание кронштейна; 10- защелка направляющих кронштейна.

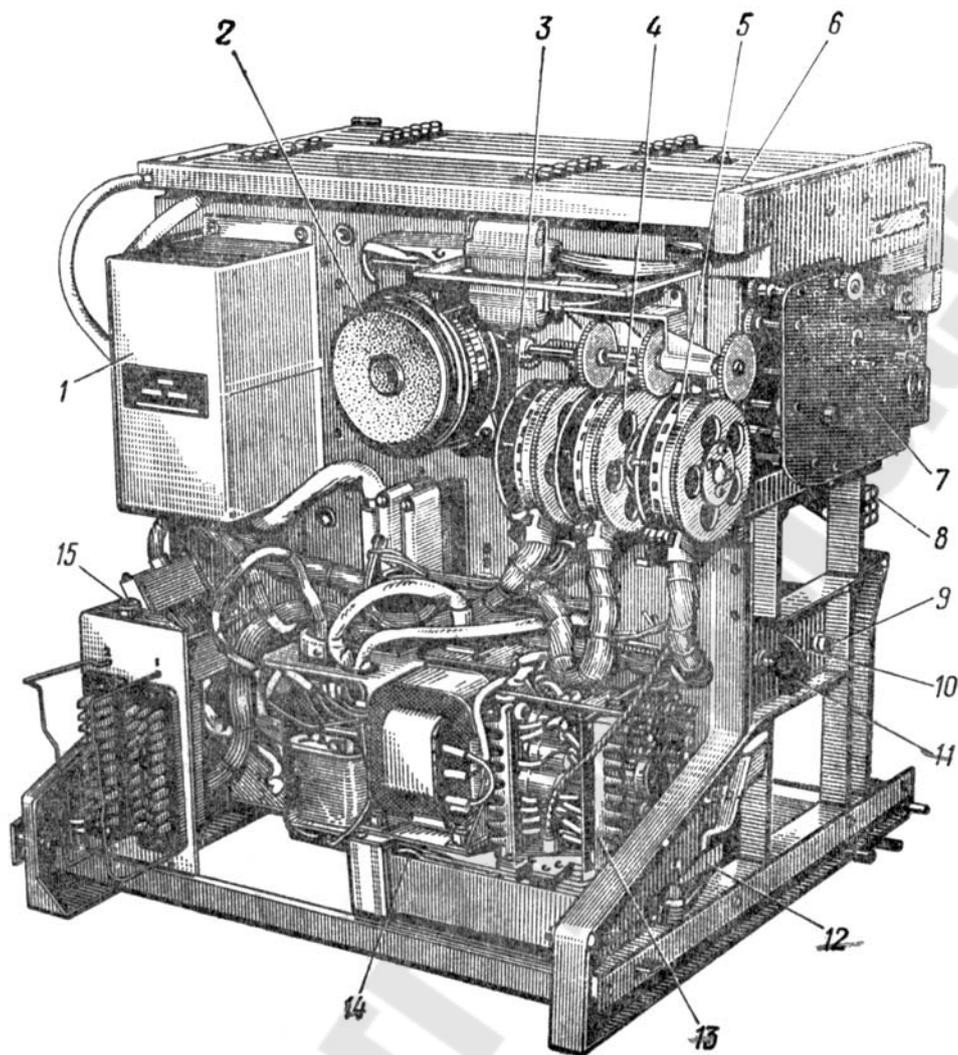


Рис. 4. Кронштейн прибора: 1 – усилитель многоканального регулирования типа УМР; 2 – реверсивный двигатель; 3 – переключатель мостов задачи; 4 – переключатель каналов регулирования; 5 – переключатель первичных преобразователей; 6 – блок задачи; 7 – редуктор; 8 – ось для крепления щитка; 9 – регулятор рабочего тока; 10 – розетка для подключения вилки при проверке рабочего тока; 11 – защелка кронштейна; 12 – усилитель; 13 – регуляторы чувствительности и обратной связи усилителя; 14 – предохранитель.

В передней части кронштейна находятся: циферблат, каретка с закрепленными на ней отсчетным и печатающим устройствами, тумблеры «ПРИБОР» и «ДИАГРАММА», рычаг переключения скоростей диаграммной ленты. На правой боковой стенке расположены предохранитель и ручка барабана с пуклевками. На левой боковой стенке кронштейна находятся: механизм управления; рычаг переключения циклов печатания; регулятор рабочего тока. Внутри кронштейна расположены: источник стабилизированного питания и фильтр;

синхронный двигатель типа СД-54; блок конденсаторов синхронного и реверсивного двигателей. На задней стенке кронштейна находятся: реверсивный двигатель; блок согласующий; усилитель; переключатель первичных преобразователей; переключатель каналов регулирования; переключатель мостов задачи и усилитель типа УМР. В верхней части кронштейна расположены: элементы измерительного моста; реохорды; позиционные регулирующие устройства; устройства аварийной сигнализации; реостатный задатчик.

Усилитель (УМР) следящей системы измерительной схемы представляет собой отдельный блок. Согласование выхода усилителя следящей системы с управляющей обмоткой реверсивного двигателя осуществляет блок согласующий, расположенный рядом с усилителем.

Реохорд является съемным линейным блоком. Его основной элемент – рабочая спираль, намотанная с определенным шагом. В корпусе реохорда имеются два смотровых окна для наблюдения за контактами. Резисторы измерительного устройства прибора выполнены в виде катушек из стабилизированной манганиновой проволоки. Панель с катушками укреплена на корпусе реохорда.

Устройство продвижения диаграммной ленты включает в себя синхронный двигатель СД-54, механизм управления, связанный через рычаг переключения скоростей с барабаном, щиток верхний, на который кладется диаграммная бумага, щиток полукруглый, огибающий барабан и служащий для заправки и правильного направления диаграммной бумаги. Откидывающийся вперед щиток с «П»-образным «отсекателем» служит как столик для отметок на диаграммной бумаге и как разделитель «слипшихся» складок бумаги. Боковые щитки с «клювиками» обеспечивают необходимый зазор между барабаном с пуклевками и лентой. Стержень с выгнутой проволокой и свободно качающаяся подвеска формирует складки, обеспечивая правильную укладку бумаги на нижний щиток.

Электродвигатель СД54 обеспечивает работу механизма управления, печати и работу переключателей прибора. Для приведения измерительной схемы прибора к равновесию служит конденсаторный синхронный реверсивный двигатель РД-09А.

Источник питания стабилизированный ИПС представляет собой отдельный блок, расположенный в нижней части кронштейна. Он осуществляет питание измерительной цепи потенциометра с постоянной нагрузкой.

Регистрация измеряемой величины осуществляется циклично нанесением на диаграммную ленту точек с порядковым номером первичного преобразователя, в момент остановок каретки. Цифра, появляющаяся в окошке каретки указывает на номер первичного преобразователя, сигнал которого будет обрабатываться в следующий период печатания.

Записывающее устройство состоит из печатающего барабана с нанесенными на его поверхности точками с цифрами и обоймы со смазывающими секторами, закрепленными на каретке.

Блок фильтров обеспечивает повышенную защищенность от электрических помех.

Упаковка прибора. Закрепить каретку обвязкой. Закрепить кронштейн с помощью вкладышей. Прибор упаковать в картонную коробку с сопроводительной документацией. Принадлежности и диафрагменную ленту упаковать в отдельную коробку. Все коробки поместить в транспортную тару (деревянный ящик).

Подключение первичных преобразователей выполняется по схеме, приведенной на рис. 5.

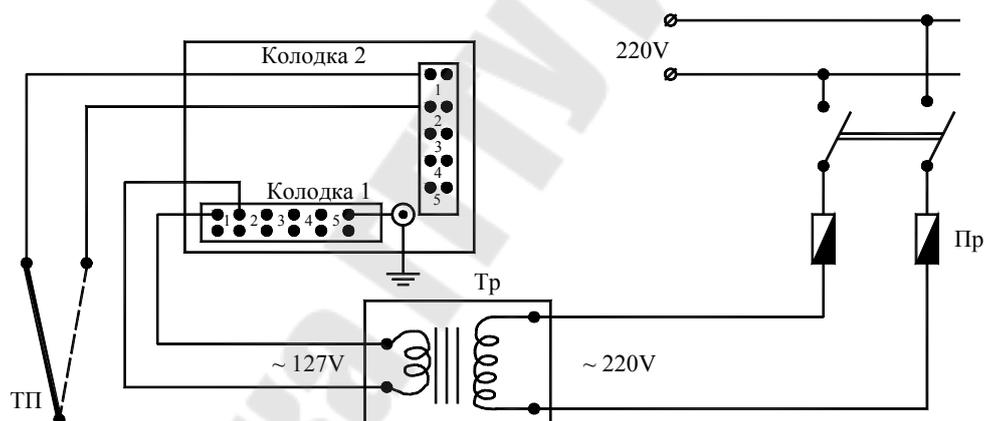


Рис.5. Схема внешних соединений.

Термоэлектрические преобразователи градуировок ТХК, ТХА, ТВР и ТПП подключают к прибору либо своими концами либо термоэлектродными проводами (ГОСТ 1791–67). Остальные типы термопар подключают медными проводами.

Выполнение работы

1. Прослушать инструктаж по ТБ.
2. Ознакомиться с устройством и принципом действия прибора автоматического следящего уравнивания КСП4.

3. Освоить работу со шкалами прибора для считывания текущего параметра, с диаграммной лентой, на которой производится регистрация показаний термопар.

4. Подготовить потенциометр к работе. Установить необходимую скорость записи.

5. Собрать схему установки (рис.6), используя термопары типа ТХА, нагревательную печь электрическую печь СНОЛ 1,6x2,5x1/11.

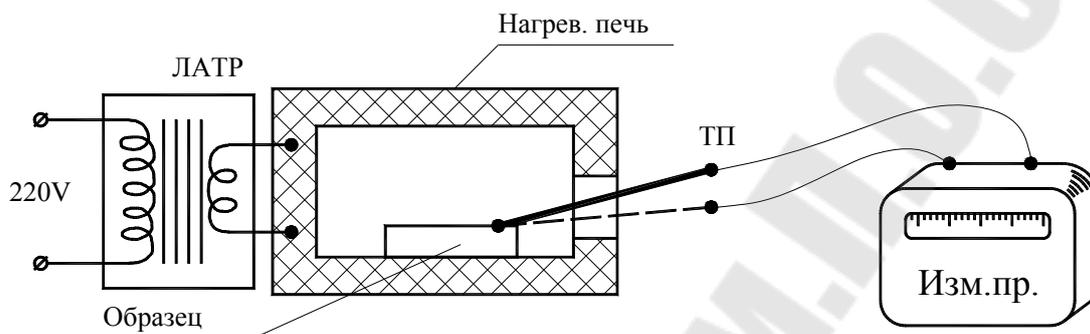


Рис.6. Схема установки.

6. Включить печь. Включить потенциометр. Произвести запись показаний термопар. Используя запись на диаграммной ленте, построить в отчете график зависимости $t = f(\tau)$ температуры от времени в прямоугольной системе координат, в заданном масштабе.

7. Включить потенциометр на работу с регулирующим устройством. Указатель регулирующего устройства установить на определенную температуру.

8. Сделать выводы и заключения по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЕРКИ.

Цель работы: Ознакомиться с назначением, классификацией, техническими требованиями, методами поверки термопар.

Теоретические сведения.

Термоэлектрический термометр – это термометр, содержащий термоэлектрический преобразователь (термопару), действие которого основано на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) термопары от температуры, и устройство для измерения т.э.д.с.

Термопара состоит из двух проводников, выполненных из разнородных материалов, которые с одной стороны сварены. Место сварки и прилегающие к нему концы термоэлектродов называются рабочим концом термопары. Рабочий конец термопары погружается в среду, температура которой измеряется. Не сваренные концы проводников являются «свободными концами», к ним подсоединяются провода от прибора, измеряющего т.э.д.с. Если температура концов различна, то в термопаре возникает т.э.д.с., величина которой зависит от материала термоэлектродов и температуры свободных и рабочего концов.

Промышленностью выпускается очень широкая номенклатура термопар. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип термопар	Литерное обозначение	Материал термопар		Диапазон измеряемых температур при длительном применении, °С	Пределная температура при кратковременном применении, °С
		положительного	отрицательного		
ТПП 13 Платинородий-платиновые	R	Сплав платинородий ПР13 (87%Pt + 13%Rh)	Платина Пл Т (Pt)	0- 1300	1600
ТПП10 Платинородий-платиновые	S	Сплав платинородий ПР10(90%Pt +10%Rh)			
ТПР Платинородий-платинородиевые	B	Сплав платинородий ПР-30 (70%Pt+30% Rh)	Сплав платинородий ПР6(94 %Pt+6%Rh)	600-1600	1700
ТЖК Железо-константаовые	J	Железо (Fe)	Сплав константан(55%Cu +45%Ni, Mn, Fe)	от -200 до +750	900
ТМКн медь-константановые	T	Медь М1(Cu)	Сплав константан(55%Cu +45%Ni, Mn, Fe)	от -200 до +350	400

Продолжение табл. 1

Тип термопар	Литерное обозначение	Материал термопар		Диапазон измеряемых температур при длительном применении, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
		положительного	отрицательного		
ТНН нихросил- нисилловые	N	Сплав нихросил [(83,49- 84,89)%Ni +(13,7- 14,7)%Cr +(1,2- 1,6)%Si+0,15 %Fe+0,05%C +0,01%Mg]	Сплав ни- сил [(94,98- 95,53)%Ni +0,02%Cr+ (4,2- 4,6)%Si+0, 15%Fe+0,0 05%C+(0,0 5- 0,2)%Mg]	от -270 до +1200	1300
ТХА Хромель-алюмелевые	K	Сплав хро- мель Т НХ9,5(90,5% Ni+9,5%Cr)	Сплав алюмель НМц АК2- 2- 1(94,5%Ni +5,5%Al, Si,Mn, Co)	от -200 до +1200	1300
ТХКн Хромель- константановые	E	Сплав хро- мель Т НХ9,5 (90,5%Ni+9,5 %Cr)	Сплав констан- тан(55%Cu +45%Ni,M n,Fe)	от -200 до +700	900
ТХК Хромель-копелевые	L		Сплав копель МНМц 43- 0,5(56%Cu +44%Ni)	от -200 до +600	800
ТМК Медь-копелевые	M	Медь М1(Cu)	Сплав ко- пельМНМ ц 43- 0,5(56%Cu +44%Ni)	от -200 до +100	100

Окончание табл. 1

Тип термопар	Литерное обозначение	Материал термопар		Диапазон измеряемых температур при длительном применении, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
		положительного	отрицательного		
ТСС Сильх-силиновые	I	Никелевый сплав сильх НХК 9-0,9 [(57,6-89,2)%Ni+(8,8-9,8)%Cr+(0,6-1,2)%Si+!%Mn,Fe]	Никелевый сплав силин НК 2,4[(91,8-92,6)%Ni+(2,0-2,8)%Si+1%Mn,Fe]	0-800	800
ТВР Вольфрамрений-вольфрамрениевые	A-1 A-2 A-3	Сплав вольфрам-рений ВР-5(95%W+5%Re)	Сплав вольфрам-рений ВР-20(80%W+20%Re)	0-2200 0-1800 0-1800	2500

Предельно допустимые значения отклонений т.э.д.с. термопар от номинального значения в температурном эквиваленте приведены в таблице 2.

Таблица 2

Тип термоэлектрического преобразователя	Буквенное обозначение	Класс	Диапазон измерений, °С	Предел допускаемых отклонений $\pm \Delta t, ^\circ\text{C}$
ТПП 13 ТПП 10	R S	1	От 0 до 1100 Св. 1100 до 1600	1 1+0,003(t-1100)
		2	От -40 до 600 Св.600 до 1700	1,5 0,0075 t

Продолжение табл. 2

Тип термо-электрического преобразователя	Буквенное обозначение	Класс	Диапазон измерений, °С	Предел допускаемых отклонений $\pm \Delta t, ^\circ\text{C}$
ТПР	В	3*	От 600 до 800 Св.800 до 1700	4 0,005t
		2	От 600 до 1700	0,0075t
ТЖК	J	2	От -40 до +333 Св. 333 до 750	2,5 0,0075t
		1	От -40 до +375 Св. 375 до 750	1,5 0,004t
ТМК _H	T	3*	От.-200 до -67 Св.-67 до +40	0,015ItI 1
		2	От-40 до +133 Св.133 до 350	1 0,0075t
		1	От-40 до+125 Св.125 до 350	0,5 0,004t
ТНН ТХА	N K	3*	От-200 до -167 Св.-167 до -40	0,015ItI 2,5
ТНН ТХА	N K	2	От-40 до +333 Св.333 до 1200	2,5 0,0075t
		1	От-40 до 375 Св.375 до1000	1,5 0,004t
ТХК _H	E	3*	От-200 до -167 Св.-167 до -40	0,015ItI 2,5
		2	От -40 до +333 Св.333 до 900	2,5 0,0075t
		1	От -40 до 375 Св.375 до 800	1,5 0,004t

Окончание табл. 2

Тип термо-электрического преобразователя	Буквенное обозначение	Класс	Диапазон измерений, °С	Предел допускаемых отклонений $\pm \Delta t, ^\circ\text{C}$
ТХК	L	3*	От -200 до -100 Св. -100 до 100	0,015ItI 2,5
		2	От -40 до 300 Св. 300 до 800	2,5 0,0075t
ТМК	M	---	От -20 до 0 Св. 0 до 100	1.3+0,001 ItI 1
ТСС	I	1	От 0 до 375 Св. 375 до 800	1,5 0,004t
		2	От 0 до 333 Св. 333 до 800	2,5 0,0075t
		3	От 0 до 40	2,5
ТВР	A -1	3*	От 1000 до 2500	0,007t
	A -2	2	От 1000 до 2550	0,005t
	A -3		От 1000 до 2550	0,005t

t- измеряемая температура, °С

Термопреобразователи выпускают следующих исполнений:

- по способу контакта с измеряемой средой : погружаемые, поверхностные;
- по условиям эксплуатации: стационарные; переносные; разового, многократного и кратковременного применений;
- по защищенности от воздействия окружающей среды: обыкновенные, водозащищенные, защищенные от агрессивной среды; взрывобезопасные (искробезопасные); защищенные от других внешних воздействий;
- по герметичности к измеряемой среде: герметичные, негерметичные;

– **по инерционности:** малой инерционности – показатель тепловой инерции не более 10 с; средней инерционности – не более 60 с; большой инерционности – более 60 с; ненормированной инерционности. Показатель тепловой инерции – время, необходимое для того, чтобы при внесении ТП в среду с постоянной температурой разность температур среды и любой точки внесенного в нее ТП стала равной 0,37 того значения, которое будет в момент наступления регулярного теплового режима;

– **по устойчивости к механическим воздействиям:** обыкновенные, виброустойчивые.

В зависимости от материалов термоэлектродов различают термопреобразователи из благородных (R, S, В) и неблагородных (J, T, K, А-1, А-2, А-3) металлов. Термопреобразователи термоэлектрические из благородных металлов применяются для измерения температуры в диапазоне 300-1600⁰С в окислительной и нейтральной средах. Недостатком является невысокая чувствительность и высокая стоимость материала. Поэтому их применяют без компенсационных проводов. Термопреобразователи термоэлектрические из неблагородных металлов применяются для измерения температуры жидкостей, газов, пара, поверхности твердых тел и др. Эти преобразователи имеют более высокую чувствительность.

ОПЕРАЦИИ ПОВЕРКИ включают: внешний осмотр, проверку электрической прочности и сопротивления изоляции, проверку стабильности, определение т.э.д.с. термопреобразователей и чувствительных элементов при заданных значениях температуры.

При внешнем осмотре должно быть установлено соответствие чувствительных элементов термопреобразователей следующим требованиям:

- а) чувствительные элементы градуировок типов **K, E, I**
 - термодпары должны быть представлены без защитных чехлов, с электрической изоляцией;
 - длина ТП и их чувствительных элементов должна быть не менее 250мм.);
 - чувствительные элементы с термоэлектродами диаметром 1 мм и более должны иметь клеммные колодки, закрепленные на термоэлектродах, для подключения удлинительных проводов;
 - термоэлектроды должны иметь ровную поверхность без трещин, раковин, расслоений, загрязнений, видимых невооруженным глазом, а также без отслаивающейся окалины. Место сварки рабочих концов термоэлектродов не должно быть пористым и ошлакованным;

б) чувствительные элементы градуировок типов **R, S, B**

– принятые на поверку термопары из благородных металлов должны быть без арматуры и электрической изоляции, перед определением т.э.д.с. их отжигают;

– отожженная поверхность должна быть чистой, если при отжиге поверхностные загрязнения не устраняются, термоэлектроды считают непригодными и к дальнейшей поверке не допускают;

– длина ТП должна быть не менее 500мм;

– термоэлектроды должны быть свернуты в кольцеобразный моток диаметром 60-100 мм и представлены в упаковке;

– ТП не должны иметь сварок, перетяжек, резких изгибов под углом;

– на поверхности не должно быть видимых невооруженным глазом плен, трещин, раковин, расслоений и загрязнений;

– при необходимости чувствительные элементы из благородных металлов взвешивают с погрешностью не более 0,05г.

Проверку электрической прочности и сопротивления изоляции преобразователей проводят по ГОСТ6616-94. Электрическая изоляция ТП должна выдерживать в течении 1 мин синусоидальное переменное напряжение 250В частотой 50Гц. Электрическое сопротивление изоляции ТП между цепью чувствительного элемента и металлической частью защитной арматуры не должно быть менее, Мом:

100-при температуре $(25\pm 10)^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности от 30 до 80%;

1,0-при 35°C , 98%; 1,0-при температуре верхнего предела измерения до 300°C ; 0,07- до 600°C ; 0,025- до 800°C ; 0,005- до 1000°C .

Проверку стабильности преобразователей и чувствительных элементов проводят при максимальной температуре длительного применения, установленной в нормативно-технической документации на поверяемый преобразователь (см. табл.3.), путем трехкратного измерения т.э.д.с., при этой температуре до и после двухчасового отжига в печи.

Градуировочные характеристики чувствительных элементов должны соответствовать их стандартным градуировочным характеристикам в пределах допустимых отклонений (см. табл. 2). При проверке этого требования определяют т.э.д.с. чувствительного элемента при нескольких заданных значениях температуры его рабочего конца

и температуре свободных концов, равной 0 °С. Полученные результаты сравнивают с данными стандартных градуировочных таблиц при тех же значениях температуры. Т.э.д.с. должна быть определена не менее чем при четырех значениях температуры, указанных в таблице 3.

Таблица 3

Тип стандартной градуировки	Диаметр термоэлектродов, мм	Значения температуры при измерении т.э.д.с., °С
E, L	От 3,2 до 1,2 вкл.	300,400,500,600,(800)
	» 0,7 » 0,2 »	100,300,400,500,(600)
K	» 3,2 » 1,2 »	300,500,700,900
	» 0,7 » 0,5 »	100,300,500,700,800
	» 0,3 » 0,2 »	100,300,400,500,600
R,S, B	От 0,5 и более	300,600,900,1200
		600,900,1200,1500

Процесс поверки ТП методом сличения термопреобразователей из благородных металлов ведется следующим образом (рис.1):

- не более четырех поверяемых элементов складывают в общий пучок вместе с термопреобразователем образцовым платинородий-платиновым термометром 3-го разряда, и обвязывают в двух, трех местах отрезками хромелевой или алюмелевой проволоки;

- пучок чувствительных элементов вводят в рабочее пространство трубчатой горизонтальной печи до упора рабочих концов в дно никелевого стакана и центрируют по оси печи;

- свободные концы чувствительных элементов (в случае необходимости удлиненных проводами) и образцового термопреобразователя термостатируют при 0 °С в сосудах заполненных смесью льда с водой, а при термостатировании при комнатной температуре- водой или маслом комнатной температуры;

- нагревают печь до заданного значения температуры (см. табл.3) с допускаемым отклонением 10 °С;

- проводят измерение т.э.д.с.; измерения начинают с образцового термометра и заканчивают последним поверяемым чувствительным элементом. После чего все измерения последовательно повторяют в обратном порядке и т.д. до получения четырех отсчетов в каждом ряду. При измерениях т.э.д.с. температура в печи не должна меняться более чем на 0,4 °С/мин. Интервалы времени между отсчетами должны быть одинаковыми. Все показания заносят в протокол (табл. 4.).

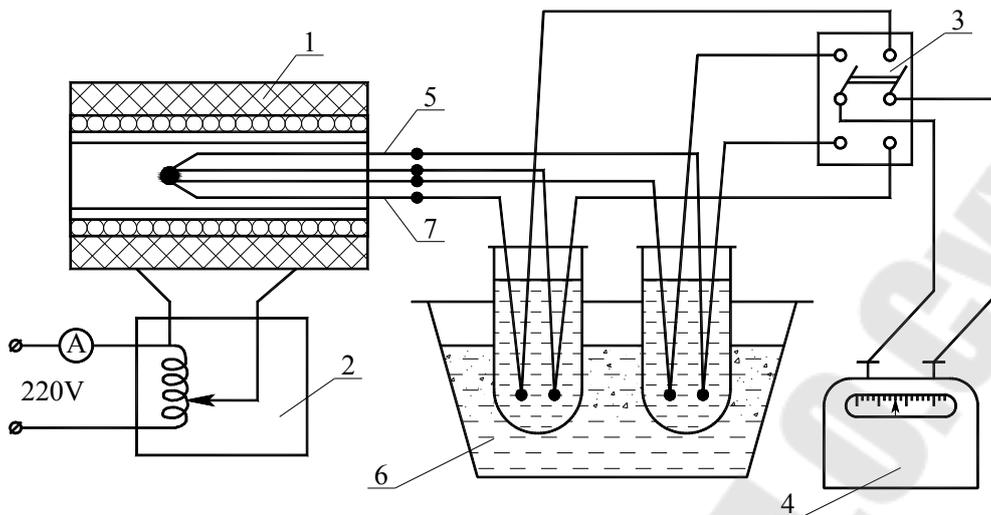


Рис.1. Схема поверки термопар методом сличения: 1-вертикальная трубчатая печь сопротивления; 2-автотрансформатор; 3-переключатель; 4- электроизмерительная установка; 5-поверяемая термопара; 6- термостат; 7- образцовая термопара.

Таблица 4.

Протокол поверки рабочих термопар (пример оформления).

Замечания по внешнему осмотру: <i>нет</i>	Показания Т.П., мВ						t св. кон. 20°C
	образец	№ поверяемых ТП					
		1	2	3	4		
Порядковый номер отсчета:	1	2.326	11.8				
	2	2.324	11.6				
	3	2.326	11.7				
	4	2.328	12.1				
Среднее арифметическое значение 4-х измерений	2.326	11.8					
Поправка на образцовую термопару по свидетельству	+0.009	-					
Поправка на t св. концов Т.П.	+0.111	+0.80					
Показания Т.П. с учетом поправок, соответствующее истин. темпер.	2,446	12,6					
Истин. температура раб. концов Т.П. t °C	304,7	309,5					Погрешность, °C 304,7-309,5= -4.1
Заключение	ТП не годна, т.к допустимая погрешность ± 2,5 °C						

Обработка результатов измерений. Определяют среднее значение т.э.д.с. образцового термоэлектрического термометра. По свидетельству на образцовую ТП выбирают поправку ближайшую к среднему значению т.э.д.с. Определяют поправку на температуру свободных концов; она имеет знак «плюс» и численно равна табличному значению т.э.д.с. при такой температуре, какую при поверке имели свободные концы. Все показания алгебраически складывают и получают значение т.э.д.с. соответствующее истинной температуре. Определяют приведенное значение т.э.д.с. поверяемой ТП. Оно берется как сумма среднего значения т.э.д.с. и поправки на температуру свободных концов. По стандартной градуировочной таблице (см. приложение А) определяют истинное значение температуры рабочих концов образцовой Т.П. По стандартной градуировочной таблице (см. приложение Б) определяют значение температуры рабочих концов поверяемых термопар, разность между истинной и приведенным значениями температуры для каждой из поверяемых термопар и есть погрешность, значение которой должно находиться в пределах установленных ГОСТом, см. табл.2.

Поверка методом поэлектродного сличения (рис. 2.) чувствительных элементов градуировок типа R,S,B с образцовым платинородий-платиновым термоэлектрическим термометром 2-го разряда заключается в определении т.э.д.с. термопары, образуемой **одноименными** термоэлектродами градуируемой и образцовой термопар.

Нагревают горизонтальную или вертикальную трубчатую печь до заданного значения температуры с допускаемым отклонением не более чем 10°C , см. табл.3. Температуру контролируют образцовым термометром.

Не более четырех поверяемых чувствительных элементов складывают в общий пучок с однотипным образцовым термометром 2-го разряда.

Пучок погружают в рабочее пространство печи.

Свободные концы термостатируют и подсоединяют к измерительной установке по схеме (рис. 2).

При измерениях т.э.д.с. поверяемых чувствительных элементов температура не должна меняться более чем на $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Измеряют т.э.д.с термопары, образованной положительными термоэлектродами образцового термометра и поверяемого чувствительного элемента при выбранной температуре, мВ. Затем измеряют т.э.д.с термопары, образованной отрицательными термоэлектродами

образцового термометра и поверяемого чувствительного элемента при выбранной температуре, мВ. Т.э.д.с. каждой пары измеряют дважды. Все отсчеты проводят с точностью до 10^{-3} мВ. Заполняют протокол поверки.

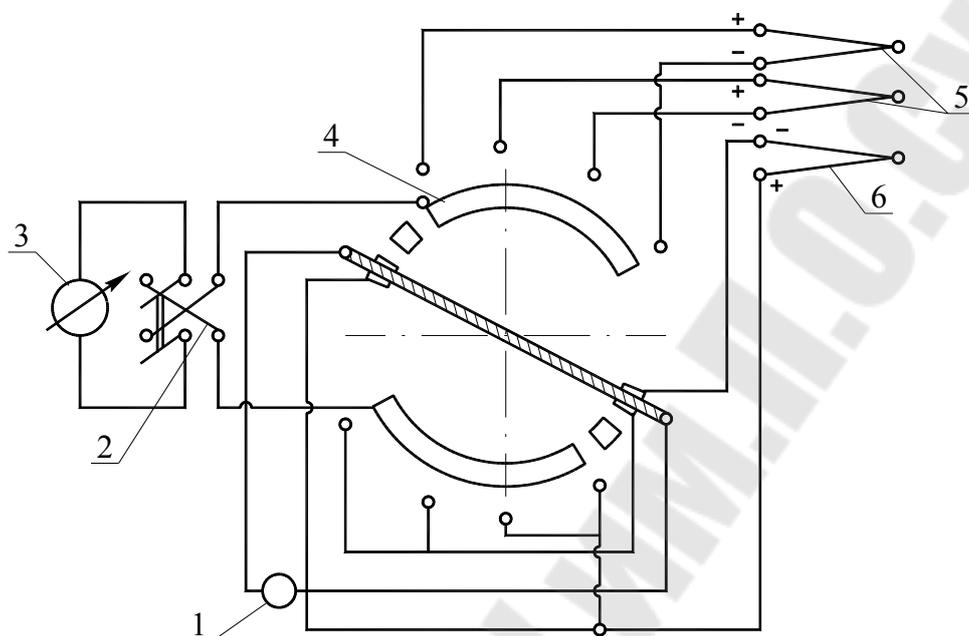


Рис.2. Электрическая схема соединения при поэлектродной методике поверки:
 1 – милливольтметр; 2 – переключатель; 3 – гальванометр; 4 – переключатель;
 5 – поверяемые термопары; 6 – образцовая термопара.

Обработка результатов измерений методом поэлектродного сличения. Из результатов измерений, выполненных по приведенной выше методике, вычисляют средние арифметические значения т.э.д.с. термоэлектродов каждого поверяемого чувствительного элемента в паре с одноименными термоэлектродами образцового термометра ($de_1=1,2,3\dots$). Определяют разность dE по формуле

$$dE = de_1 - de_2,$$

где de_1 – т.э.д.с. пары, образованной положительными термоэлектродными образцового термометра и поверяемого чувствительного элемента при температуре t , мВ; de_2 – т.э.д.с. пары, образованной отрицательными термоэлектродными образцового термометра и поверяемого чувствительного элемента при температуре t , мВ.

Вычисляют значение т.э.д.с. $E_{\text{пов.}}$ – поверяемых чувствительных элементов при температуре t по формуле

$$E_{\text{пов.}} = E_{\text{свид.}} + dE,$$

где $E_{\text{свид.}}$ – т.э.д.с. образцового термометра, значения которой даны в свидетельстве о поверке, при температуре t . По стандартной градуировочной таблице находят нормированное значение их т.э.д.с., соответствующее температуре t . Температура определяется по приведенному значению т.э.д.с. образцового термометра с учетом поправки, взятой из свидетельства и поправки на температуру свободных концов. Для каждого поверяемого чувствительного элемента определяют разность между приведенным и нормированным значением т.э.д.с. при каждой температуре. Разность должна быть в пределах установленной.

Положительные результаты поверки оформляют нанесением поверительного клейма на клеммную колодку чувствительного элемента или бирку.

Материалы, инструмент, оборудование.

1. Электрическая печь.
2. Образцовая термопара.
3. Поверяемые термопары.
4. Измерительные устройства.
5. Соединительные провода.
6. Никелевый блок.

Выполнение работы.

1. Ознакомиться с термопарами, их характеристиками и конструктивными оформлениями.
2. Ознакомиться с методами и средствами поверки термопреобразователей технических термоэлектрических термометров.
3. Собрать одну из схем поверки термопар (по указанию преподавателя).
4. В соответствии с ранее описанной методикой провести 4 отсчета и занести в протокол.
5. Произвести все необходимые расчеты, предусмотренные формой протокола.
6. Сделать заключение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ЧЕРЕЗ СТЕНКИ ПЕЧИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ЕЕ РАБОТЫ.

Цель работы: сравнить тепловые потоки через однослойную и двухслойную стенки печи; произвести расчет тепловых потерь через однослойную и двухслойную стенки печи, на основе формул теплопроводности, и сравнить с тепловыми потерями, подсчитанными по формулам теплоотдачи от поверхности стенки.

Теоретические сведения.

В промышленных печах необходимая для нагрева металла температура печного пространства обеспечивается генерированием расчетного количества тепла с учетом тепловых потерь. Тепло получают в пламенных печах за счет сжигания топлива, в электропечах сопротивления – за счет преобразования электрической энергии в тепловую. Идеально изолированного печного пространства не бывает. В действительности всегда имеют место тепловые потери. К ним относятся потери тепла через стенки печи, загрузочные окна, различные технологические отверстия в окнах, потери тепла с уходящими газами и др.

Подсчет потерь тепла производится при составлении теплового баланса печи, необходимого для определения расхода топлива.

Рассмотрим более подробно подсчет потерь тепла через стенку печи. В твердых телах передача тепла осуществляется колебательными движениями молекул и свободных электронов, т. е. теплопроводностью. Все случаи распространения тепла теплопроводностью выражает общее дифференциальное уравнение теплопроводности – уравнение Фурье (1), связывающее температуру любой точки твердого тела со временем и пространственным положением данной точки.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где t – температура точки твердого тела; τ – время; x, y, z – координаты точки; α – коэффициент температуропроводности.

Из общего уравнения можно выделить частные случаи. Одним из таких частных случаев является независимость температуры от времени ($\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$). Такое температурное поле называется стационар-

ным. Дифференциальное уравнение Фурье для стационарного поля примет вид ($\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$), интегрируя это уравнение, получаем:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = A \quad \text{и} \quad t = Ax + B, \quad (2)$$

где A и B – постоянные интегрирования, определяемые из начальных и краевых условий.

Данное уравнение показывает, что при стационарном тепловом состоянии температура изменяется по закону прямой линии.

Рассмотрим передачу тепла теплопроводностью через однослойную стенку при стационарном тепловом поле (рис. 1)

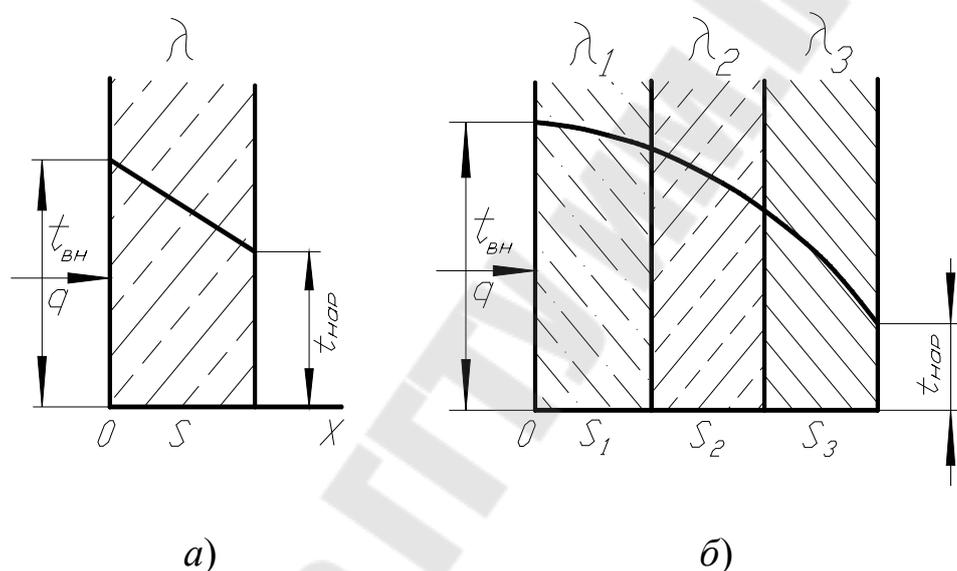


Рис.1. Схемы распределения температур при передаче тепла теплопроводностью через однослойную (а) и многослойную (б) стенки.

Теплота передается от внутренней поверхности стенки печи с температурой $t_{\text{вн}}$ к наружной поверхности стенки печи с температурой $t_{\text{нар}}$ через стенку толщиной S . Координату x направляем параллельно тепловому потоку q , т.е. перпендикулярно к поверхности. Постоянные интегрирования A и B определяем из принятых условий:

при $x=0$ $t = t_{\text{вн}} = \text{const}$,

при $x=S$ $t = t_{\text{нар}} = \text{const}$,

Подставляя эти значения в уравнение (2), получаем $B = t_{\text{вн}}$, $A = (t_{\text{нар}} - t_{\text{вн}}) / S$.

Температура в стенке будет распределяться по закону

$$t = t_{\text{вн}} - \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{S} \cdot x, \quad (3)$$

Величина же теплового потока будет равна

$$q = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{s}, \quad (4)$$

так как $\frac{\partial t}{\partial x} = A = -\frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{s}$.

С небольшими погрешностями можно рассматривать передачу тепла через стенки промышленных печей как случай стационарного теплового поля. Для уменьшения тепловых потерь и для более рационального использования огнеупорных и теплоизоляционных материалов стенки промышленных печей делают многослойными.

Величина теплового потока для многослойной стенки определяется по формуле:

$$q = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + \dots + s_n/\lambda_n}, \quad (5)$$

Итак, используя уравнение (4) и (5), можно решать следующие практические задачи:

- а) зная температуры и характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов стенки, можно определить потери тепла;
- б) зная температуры и потери тепла, можно подобрать оптимальные размеры многослойной стенки промышленной печи;
- в) зная тепловой поток, характеристики стенок печи и температуру печного пространства, можно вычислить температуру наружной стенки печи.

Тепловой поток, прошедший через стенку печи, уносится окружающей средой с помощью конвективного теплообмена. Если известны температура стенки и температура среды, то тепловой поток можно определить по уравнению Ньютона. Например, для наружной стенки

$$q = \alpha (t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}}), \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Материалы, инструмент, оборудование. Работа выполняется на установке, состоящей из двух печей. Свод печи I выполнен из шамотного кирпича толщиной 65 мм. Свод печи II – двухслойный; внутренний слой выполнен из магнезита, наружный – из шамота, оба толщиной по 65 мм.

В своды обеих печей встроены термопары ХА, соединенные через переключатель с потенциометром. Расположение термопар показано на рис. 2.

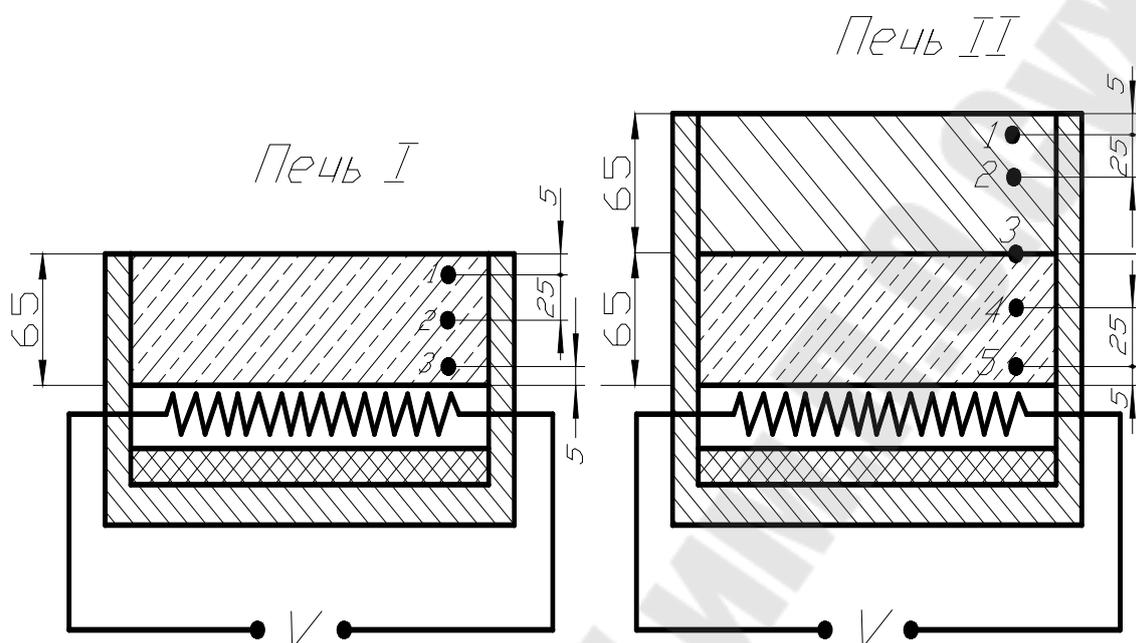


Рис.2. Схема установки и расположения термопар в печи.

Выполнение работы.

1. Установить стационарное температурное поле в обеих печах.
2. Через каждые 15-20 мин. записать показание всех термопар (допускается нестационарный режим 10-15 град/час).
3. Построить графики распределения температур по толщине для однослойной и двухслойной стенок печи.
4. Экстраполяцией найти температуры на внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{нар}$ поверхностях стенок.
5. Определить тепловой поток по уравнению (5) и по уравнению (6) для однослойной стенки печи.
6. Определить тепловой поток по уравнению (5) и по уравнению (6) для двухслойной стенки печи.
7. Сравнить полученные результаты и сделать выводы.

Пояснения

Для расчетов взять последние записи температур.

Коэффициенты теплопроводности λ определяют в зависимости от средней температуры слоя. При двухслойной кладке средняя температура внутреннего слоя равна:

$$t_{\text{ср1}} = \frac{t_{\text{вн}} + t_{\text{окр}}}{2},$$

где $t_{\text{вн}}$ – температура внутренней поверхности кладки; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха.

Средняя температура наружного слоя равна:

$$t_{\text{ср2}} = \frac{t_{\text{ср1}} + t_{\text{окр}}}{2}.$$

Коэффициент теплоотдачи α , входящий в уравнение (6), складывается из коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией и подсчитывается по упрощенной формуле: $\alpha = 8 + 0,05 t_{\text{нар}}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЕТАЛЛА.

Цель работы: определить зависимость суммарного коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{л+к}$) от температуры, сравнить роль теплоотдачи конвекцией (α_k) и излучением (α_l) при различных температурах образца.

Теоретические сведения.

Основным процессом, происходящим при охлаждении металла, является процесс передачи тепла с поверхности охлаждаемого тела в окружающее пространство. Передача тепла происходит соприкосновением (конвекцией) и лучеиспусканием. Сущность передачи тепла **конвекцией** заключается в том, что тепло переносится вследствие движения частиц среды, т.е. молекулы движущейся среды (газа или жидкости), соприкасаясь с телом, отдают его поверхности тепло или принимают тепло от поверхности в зависимости от того, где выше температура. Поэтому передача тепла конвекцией тесно связана с характером движения этих частиц и может совершаться между поверхностью твердого тела и окружающим ее газом (воздухом).

В соответствии с характером движения газа (воздуха) различают свободную конвекцию (теплопередача при свободном движении газа или воздуха, например при естественном охлаждении стенки печи, металла в среде окружающего воздуха) или вынужденную конвекцию (теплопередача при вынужденном движении газа или воздуха, например при подачи воздуха вентилятором).

Вынужденная конвекция в соответствии с режимом движения делится на теплоотдачу конвекцией при ламинарном режиме и теплоотдачу конвекцией при турбулентном режиме.

Тепловой поток при теплопередаче конвекцией считают пропорциональным разности температур поверхностей тела и окружающей среды (воздуха) – формула Ньютона:

$$q_k = \alpha_k (t_{пов} - t_{окр}), \quad (1)$$

где α_k – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплоотдачи конвекцией, т. е. количество тепла, которое отдается поверх-

ностью твердого тела площадью 1 м^2 в течении часа при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в 1°С .

При свободной конвекции в жидкостях и газах (воздухе), окружающих поверхность теплоотдающего или тепловоспринимающего тела, благодаря изменению плотности частиц, соприкасающихся с поверхностью, возникают вертикальные потоки.

При $t_{\text{пов}} > t_{\text{окр}}$ частицы будут двигаться вдоль поверхности вверх, а при $t_{\text{пов}} < t_{\text{окр}}$ – вниз. Свободное движение частиц зависит от теплообмена: чем интенсивнее теплообмен, тем интенсивнее и движение.

Вначале течение частиц вдоль поверхности имеет струйчатый ламинарный характер (зона I), рис. 1. Далее по направлению движения толщина движущегося слоя увеличивается, и характер движения частиц становится неустойчивым, волновым, локонообразным – зона II, а затем переходит в вихревой, турбулентный, с отрывом вихрей от стенки (зона III). С изменением характера движения частиц изменяется теплоотдача. При ламинарном режиме с увеличением толщины слоя коэффициент теплоотдачи конвекцией по направлению движения падает, а затем при локонообразном и турбулентном быстро возрастает и остается постоянным.

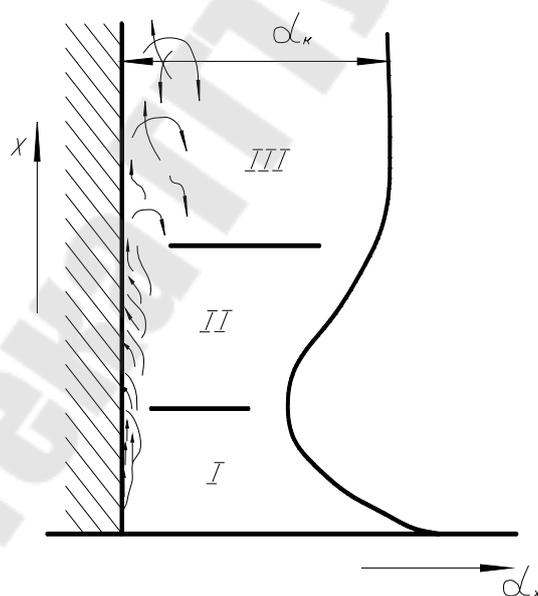


Рис. 1. Характер движения частиц и изменение коэффициента теплоотдачи α_k при свободном движении воздуха (при естественном охлаждении металла).

Для определения α_k обычно пользуются экспериментальными формулами, разработанными на основе теории подобия в критериальном виде.

Расчетная формула для определения коэффициента теплоотдачи α_k при расположении нагреваемого или охлаждаемого тела в неограниченном объеме в критериальном виде записывается так:

$$Nu = C (Gr_m Pr_m)^n \left(\frac{Pr_{окр}}{Pr_{пов}} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где $Nu = \alpha_k \frac{l}{\lambda_m}$ – критерий Нуссельта, в котором: α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией; l – определяющий размер – диаметр для горизонтальной трубы, высота для вертикальной трубы или вертикальной плоскости, меньшая сторона – для горизонтальной пластины; λ_m – коэффициент теплопроводности окружающей среды.

Индекс m здесь и в других местах означает, что физические параметры или критерии берутся при температуре пограничного слоя, определяемой как среднеарифметическое от температуры поверхности тела и окружающей среды, т.е. $t_m = \frac{t_{пов} + t_{окр}}{2}$.

$Gr_m = \frac{l^3 g (t_{пов} - t_{окр}) \beta}{\nu_m^2}$ – критерий Грасгофа, характеризующий процесс свободного движения частиц среды, в который входят:

g – ускорение силы тяжести;

β – коэффициент объемного расширения;

ν_m^2 – коэффициент кинематической вязкости;

$Pr = \frac{\nu_m}{\alpha_m}$ – критерий Прандтля;

α_m – коэффициент температуропроводности, который является функцией теплопроводности, теплоемкости, объемного веса, т.е.

$\alpha_m = \frac{\lambda}{c\rho}$, где λ – коэффициент теплопроводности тела; c – удельная теплоемкость для средней по массе температуры тела; ρ – объемный вес.

C и n – постоянные, связанные с величиной произведения ($Gr_m Pr_m$) и формой поверхности.

При $10^3 < (Gr_m Pr_m) < 10^9$ (ламинарный режим) $n=0,25$, $C=0,5$ для горизонтальных труб и вертикальных поверхностей.

Для газов (воздуха)

$Pr = \text{const.}$ $Pr_{ср} / Pr_n = 1$ и поэтому критериальные уравнения упрощаются.

При расчете теплоотдачи от наружных поверхностей стенок печей, поверхности охлаждаемого металла к воздуху можно пользоваться следующей приближенной формулой:

$$\alpha_k = K \sqrt{t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}},$$

где K – коэффициент, равный: для вертикальной поверхности – 2,2; для горизонтальной поверхности, обращенной теплоотдающей поверхностью вверх – 2,8, вниз – 1,4.

Для вертикальных стенок коэффициент теплоотдачи α_k при свободной конвекции можно определить по формуле:

$$\alpha_k = 6,95^4 \sqrt{\frac{t_{\text{ст}} - t_{\text{окр}}}{(t_{\text{окр}} + 273) H_{\text{ст}}}},$$

где $t_{\text{ст}}$ – температура стенки; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха; $H_{\text{ст}}$ – высота стенки.

При вынужденной конвекции критериальная зависимость для определения Nu_m , а следовательно, и α_k имеет более сложный вид:

при ламинарном режиме $Re_{\text{ср}} \leq 2 \cdot 10^3$,

$$Nu_m = 0,15 Re_{\text{окр}}^{0,33} Pr_{\text{окр}}^{0,43} Gr_{\text{окр}}^{0,1} \left(\frac{Pr_{\text{окр}}}{Pr_{\text{пов}}} \right)^{0,25}, \text{ при турбулентном режиме}$$

жиме

$$Re_{\text{ср}} > 10^4. \quad Nu_m = 0,021 Re_{\text{окр}}^{0,8} Pr_{\text{окр}}^{0,43} \left(\frac{Pr_{\text{окр}}}{Pr_{\text{пов}}} \right)^{0,25}$$

Следует отметить, что при вынужденной конвекции, чем выше турбулизация, тем интенсивнее теплоотдача, т.к. при этом за один и тот же промежуток времени большее количество молекул соприкасается с поверхностью нагреваемого (охлаждаемого) тела.

Излучение (лучеиспускание) – этот вид теплоотдачи связан с распространением в пространстве электромагнитных волн. На поверхности излучающего тела тепловая энергия превращается в электромагнитные колебания (волны), которые, попадая на поверхность какого-либо другого тела, опять превращаются в тепловую энергию. Следовательно, интенсивность лучеиспускания определяется температурой.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием может быть определен по уравнению

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}}, \quad (3)$$

где $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения тела, равный произведению $C_0 \varepsilon$.

Здесь C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела:

$$C_0 = 4,96 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}^4) = 5,67 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{K}^4;$$

ε – степень черноты тела.

$T_{пов}$, $T_{окр}$ – температура соответственно поверхности твердого тела и окружающей среды в $^{\circ}\text{K}$;

$t_{пов}$, $t_{окр}$ – температура соответственно поверхности твердого тела и окружающей среды в $^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, тепло, отдаваемое поверхностью твердого тела окружающей среде за время $d\tau$, определяется по следующей формуле:

$$dQ = C_{пр} \left[\left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right] F d\tau + \alpha_k (t_{пов} - t_{окр}) F d\tau, \quad (4)$$

где F – поверхность тела, м^2 .

Первый член этого уравнения выражает тепло, отдаваемое поверхностью тела лучеиспусканием, а второй – тепло, отдаваемое конвекцией.

Формулу (4) можно упростить, сведя ее к формулам, например, выражающим закон конвекции. В этом случае будем иметь

$$dQ = \alpha_{л+к} (t_{пов} - t_{окр}) F d\tau, \quad (5)$$

$$\text{При этом } \alpha_{л+к} = \frac{C_{пр} \left[\left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right]}{t_{пов} - t_{окр}} + \alpha_k = \alpha_l + \alpha_k.$$

Количество тепла, отдаваемого поверхностью тела окружающей среде, можно определить также и по изменению теплосодержания тела:

$$dQ = c G dt_{ср}, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость тела при данной температуре, G – масса охлаждаемого тела; $dt_{ср}$ – средняя по массе температура тела.

Если охлаждаемое тело имеет высокий коэффициент теплопроводности и небольшую толщину, то разностью температур по сечению тела можно пренебречь и считать, что $t_{ср} = t_{пов} = t$, тогда приравняв правые части уравнений (5) и (6), получим для скорости охлаждения следующее выражение:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha_{л+к} (t_{пов} - t_{окр})}{cG}. \quad (7)$$

Таким образом, при известных значениях $\frac{dt}{d\tau}$, c , G и F по данному уравнению можно определить величину суммарного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{л+к}$. Скорость охлаждения тела $\left(\frac{dt}{d\tau}\right)$ при различных температурах можно определить графическим путем, измеряя температуру охлаждаемого тела в различные моменты времени и построив графики зависимости $t=f(\tau)$.

Материалы, инструмент, оборудование.

Для выполнения работы необходимо иметь:

1. Электрическую печь.
2. Стальной образец размерами : диаметр $d= 30\text{мм}$, высота $h= 100\text{мм}$.
3. Термопары.
4. Прибор для измерения температуры (потенциометр).
5. Штатив для подъема образца.
6. Секундомер.
7. Клещи.

Выполнение работы.

1. Поместить образец в предварительно разогретую до 900°C печь.
2. После нагрева образца до $800-850^{\circ}\text{C}$ быстро вытащить его из печи и подвесить на штатив.
3. Произвести запись температуры образца .
4. Построить график зависимости $t=f(\tau)$.
5. Вычислить для 4÷5 значений температур (по указанию преподавателя) величину скорости охлаждения образца $\frac{dt}{d\tau}$. Скорость охлаждения в любой точке кривой равна тангенсу угла наклона соответствующей касательной к оси абсцисс.
6. Определить суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{л+к}$ по уравнению (7)
7. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к}$ по уравнению (2).
8. Определить коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием $\alpha_{л}$.

9. Определить коэффициент излучения $C_{\text{пр}}$ образца по уравнению (3).

10. По полученным данным построить график зависимости $C_{\text{пр}}=f(t)$ и на одном координатном поле графики зависимости $\alpha_{\text{л}}=f(t)$ и $\alpha_{\text{к}}=f(t)$.

11. Дать анализ полученных графиков.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

НАГРЕВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

Цель работы: 1. По опытным данным построить кривые зависимости изменения температуры от времени для поверхности и центра образцов, изготовленных из стали и теплоизоляционного материала, сравнить ход нагрева этих образцов (разность температур поверхности и центра, скорость нагрева).

2. Определить значения температуры поверхности и центра образцов по теоретической формуле (при решении уравнения теплопроводности) и сравнить их с экспериментальными значениями.

Теоретические сведения.

Материал, помещенный в разогретую печь, получает тепло от газообразных продуктов горения и стен рабочего пространства излучением, а также конвекцией от продуктов горения. Тепло с поверхности материала передается внутрь его теплопроводностью. Распространение тепла теплопроводностью выражает дифференциальное уравнение теплопроводности – уравнение Фурье, устанавливающее связь между временным и пространственным изменением температуры тела:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Если нагреваемое цилиндрическое тело имеет длину, в несколько раз превышающую диаметр, то можно считать, что тепло поступает только через боковую поверхность.

В данном случае для цилиндра уравнение Фурье имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности; t – температура в точке с координатой r в момент времени τ .

Решение дифференциального уравнения теплопроводности выполняют на основании начальных и граничных условий (условий однозначности).

Начальным условием называется распределение температуры в теле в какой-либо момент времени, обычно в начальный, при $\tau=0$.

Граничными или поверхностными называются условия, характеризующие изменение температуры на границе (на поверхности) тела или тепловое взаимодействие поверхности тела с окружающей его средой.

Различают граничные условия:

Первого рода, если задано распределение температуры на поверхности тела;

второго рода – если известна величина теплового потока на поверхности тела;

третьего рода – если задана температура среды, окружающей тело, и известен закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Рассмотрим более подробно решение условия третьего рода, которое справедливо, например, при нагревании тела в среде с постоянной температурой. Для этого случая начальным условием будет: при $\tau=0$, $t=t_{\text{нач}} = \text{const}$. Граничное условие: тепловой поток на поверхности пропорционален разности температур между окружающей средой и поверхностью.

$$q_{\text{п}} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x_{\text{при } x=\pm s}} = \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{окр}} - t_{\text{пов}}), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{л+к}}$ – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплоотдачи на поверхности тела (за счет лучеиспускания и конвекции); λ – коэффициент теплопроводности тела; $\frac{\partial t}{\partial x}$ – температурный градиент.

Решение основного дифференциального уравнения при этих условиях в общем виде будет:

$$\Theta = \frac{t_{\text{окр}} - t_x}{t_{\text{окр}} - t_{\text{нач}}} = f(\text{Bi}; \text{Fo}; x/s), \quad (4)$$

Θ – температурный критерий, определяющий значение температуры (поверхности или центра) пластины или цилиндра; Bi – критерий Био, характеризующий соотношение между количеством тепла, получаемым поверхностью, и количеством тепла, отводимым внутрь тела (для цилиндра $\text{Bi} = \frac{\alpha_{\text{л+к}} R}{\lambda}$, для пластины $\text{Bi} = \frac{\alpha_{\text{л+к}} S}{\lambda}$); Fo – критерий Фурье, характеризующий подобие при распределении тепла теплопроводностью внутри тела:

$$\text{Fo} = \frac{\alpha \tau}{S^2 (R^2)},$$

где α – коэффициент температуропроводности ($\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$). Здесь c – удельная теплоемкость для средней по массе температуре тела; ρ – объемный вес.

Для стали $\rho=7800\text{кг/м}^3$

для шамота $\rho=1800\text{кг/м}^3$

для магнезита $\rho=2600\text{кг/м}^3$

Значение функций $f(Bi;Fo)$ для поверхности ($x=\pm S$ или $r=R$) и для центра ($x=0$ или $r=0$) пластины и цилиндра в зависимости от критериев Био и Фурье берутся из графиков, построенных Д.В.Будриным, см. приложение А.

Распределение температуры по сечению тела подчиняется закону параболы, а средняя по массе температура тела равна:

$$\text{Для пластины } t^{cp} = t_{ц} + \frac{1}{3}(t_{пов} - t_{ц}) = t_{пов} - \frac{2}{3}(t_{пов} - t_{ц}),$$

$$\text{Для цилиндра } t^{cp} = t_{ц} + \frac{1}{2}(t_{пов} - t_{ц}) = t_{пов} - \frac{1}{2}(t_{пов} - t_{ц}).$$

$t_{ц}$ и $t_{пов}$ – соответственно температура центра и поверхности тела.

Приведенные графики и формулы можно использовать и для случая охлаждения тел в среде с постоянной температурой.

При сложных начальных и граничных условиях математическое решение уравнения теплопроводности не всегда возможно. В этих случаях задачу иногда можно решить приближенно – методом конечных разностей с удовлетворительными для практики результатами.

Материалы, инструмент, оборудование.

Для выполнения работы необходимо иметь:

1. Муфельную печь (электрическую), в которой поддерживается постоянная температура;
2. Цилиндрические образцы, изготовленные из стали и шамота (размеры образцов $d=40\text{мм}$; $h=100\text{мм}$);
3. Термопары.
4. Прибор для измерения температуры.
5. Секундомер.
6. Клещи

Термопары встроены в центре и на поверхности каждого образца. Одна термопара введена в печь для измерения температуры печи. Все термопары через переключатель соединены с прибором для измерения температуры (потенциометром или вольтметром).

Выполнение работы.

1. В нагреваемую печь поместить образец, изготовленный из стали.

2. Через минуту произвести измерение температуры поверхности образца, еще через 30 с – центра образца. Далее с интервалом в 1 мин произвести измерения температуры поверхности и центра образца. В промежутках между этими измерениями записать температуру печи.

3. При разнице температуры центра образца и температуры печи в 40–50°C измерения прекратить.

4. Далее в печь поместить образец, изготовленный из шамота и измерения температуры провести в том же порядке.

5. Построить кривые нагрева образцов $t_{\text{пов}}=f(\tau)$ и $t_{\text{ц}}=f(\tau)$

6. Вычислить критерий Био по формуле $Bi = \frac{\alpha_{\text{л+к}} R}{\lambda}$. Т.к. в электрических печах почти все тепло передается лучеиспусканием, то коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{л+к}} = \frac{C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{об}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печ}} - t_{\text{об}}},$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения.

$$C_{\text{пр}} = C_0 \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

где $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$ – степень черноты металла и стен печи; F_1, F_2 – площади поверхности металла и стен печи.

Т. к. температура поверхности образца при его нагреве изменяется, то расчет следует вести по среднегеометрическому значению коэффициента теплопередачи:

$$\alpha_{\text{л+к}} = \sqrt{\alpha_{\text{н}} \alpha_{\text{к}}},$$

где $\alpha_{\text{н}}$ и $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициенты теплоотдачи, подсчитанные по температуре поверхности образца в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени.

Коэффициент теплопроводности λ , входящий в критерий Био, определить в зависимости от средней по массе и по времени температуры образца, т.е.

$$t_d = \frac{t_{нач} + \frac{t_{пов} + t_{ц}}{2}}{2}$$

7. Вычислить критерий Фурье $Fo = \frac{\alpha \tau}{(R^2)}$

8. По графикам Д. В. Будрина определить температурные критерии:

Для поверхности цилиндра

$$\Theta_{пов} = \frac{t_{окр} - t_{пов}}{t_{окр} - t_{нач}}$$

Для центра цилиндра

$$\Theta_{ц} = \frac{t_{окр} - t_{ц}}{t_{окр} - t_{нач}}$$

9. По полученным значениям температурных критериев найти теоретическую температуру в центре ($t_{ц}^*$) и на поверхности образца ($t_{пов}^*$)).

10. Результаты опытов и вычислений поместить в таблицу 1.

Таблица 1

Материал образца	$t_{печ}, ^\circ\text{C}$	$\tau,$ мин	$t_{пов}$	$t_{ц}$	$t_{нач}$	Bi	Fo	Θ	Θ	$t_{пов}^*$	$t_{ц}^*$
			$^\circ\text{C}$							$^\circ\text{C}$	

Сделать сравнительный анализ хода нагрева образцов, сравнить экспериментальные и теоретические значения температуры поверхности и центра образцов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЕЧИ.

Цель работы: произвести расчет времени нагрева заготовок в печах с постоянной температурой и построить график продолжительности нагрева заготовок $\tau=f(d)$.

Теоретические сведения.

Нагрев мелких и средних заготовок, а также небольших слитков на поду камерных печей с постоянной температурой широко применяют при обработке металлов давлением.

При расчетах нагрева в практических условиях на поду камерных печей приходится иметь дело с так называемым несимметричным нагревом.

Симметричным называется нагрев, когда теплопередача с обеих сторон нагреваемой пластины или во всех точках боковой поверхности цилиндра происходит одинаково. Распределение температур в этом случае показано на рис.1, а.

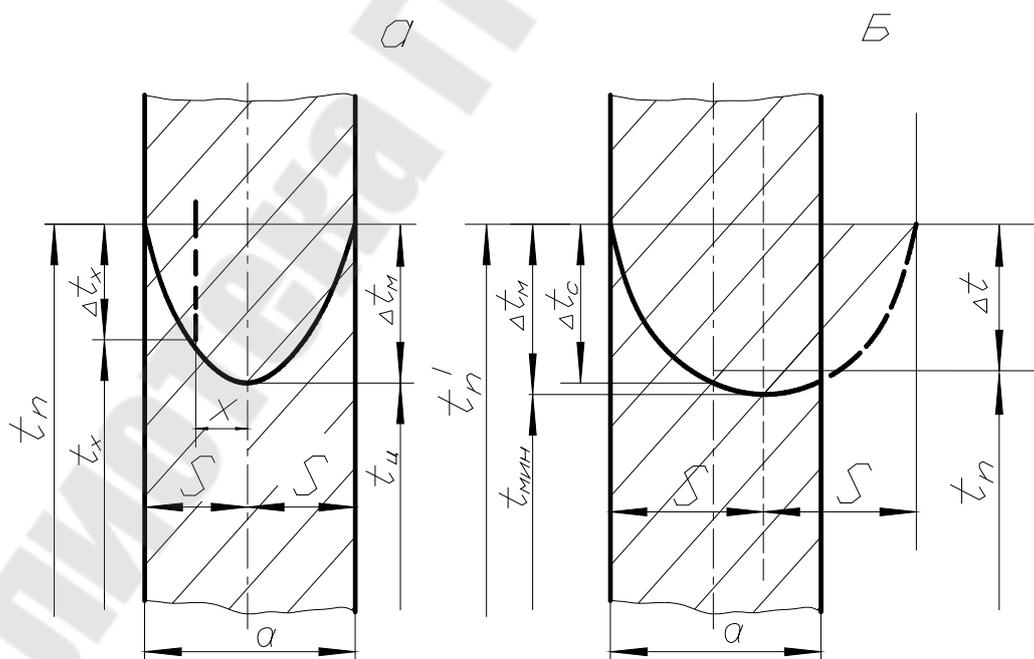


Рис.1. Распределение температур по сечению тела при симметричном (а) и несимметричном (б) нагреве.

Точка самой низкой температуры находится в геометрическом центре тела, а расстояние от нее до поверхности (расчетная толщина S_p) будет равно половине толщины пластины или радиусу цилиндра: $S_p = S/2$ или $S_p = R$.

Практически, при нагреве заготовок, лежащих на поду камерных печей, теплопередача происходит неодинаково со всех сторон. Такой нагрев называется несимметричным, рис.1,б.

Расчетную толщину (радиус) заготовки при несимметричном нагреве определяют по формуле:

$$S_p = K_n S; R_p = K_n D, \quad (1)$$

где S – толщина пластины; D – диаметр цилиндра; K_n – коэффициент несимметричности нагрева – при одностороннем нагреве $K_n = 1$, при двухстороннем (симметричном) $K_n = 0,5$; при несимметричном $0,5 < K_n < 1,0$.

Коэффициент K_n можно определить по следующим формулам, если измерить температуру в двух точках – на наружной поверхности и в геометрическом центре тела :

$$\text{для пластины} \quad K_n = \frac{\alpha \Delta t_c}{v_n X^2} + 0,25 ;$$

$$\text{для цилиндра} \quad K_n = \frac{\alpha \Delta t_c}{v_n R^2} + 0,25 ,$$

где α – коэффициент температуропроводности; v_n – скорость нагрева. Здесь $v_n = \frac{t_n^* - t_{нач}}{\tau}$

При определении продолжительности нагрева заготовок в печах различают случаи нагрева «тонких» и «массивных» тел.

Для установления границ «тонких» и «массивных» заготовок пользуются критерием Био, характеризующим соотношение между количеством тепла, полученным поверхностью ($\alpha_{л+к}$) и количеством тепла, отведенным внутрь – $\lambda/S(R)$

$$Bi = \frac{\alpha_{л+к}}{\lambda/S(R)} = \frac{\alpha_{л+к} S(R)}{\lambda}. \quad (2)$$

Если значение критерия Bi велико (процесс теплопередачи на поверхность происходит интенсивнее отвода тепла внутрь тела), то нагрев происходит с большой разностью температур между поверхностью и центром. Если значение критерия Bi мало (при более интенсивном процессе отвода тепла с поверхности внутрь), то разность температур по сечению нагреваемого тела будет небольшой. В пер-

вом случае будем иметь «массивное» тело (с точки зрения нагрева), во втором случае – «тонкое» тело.

Теоретические и экспериментальные данные показывают, что тонкими телами являются те, для которых значение критерия Bi не превышает 0,25, а массивными телами – такие, для которых $Bi > 0,5$. интервал значений $Bi = 0,25 \div 0,5$ представляет переходную область, которую при точном расчете следует отнести к «массивным» телам, а при приближенном – к «тонким».

Так как критерий Био определяется не только размерами S или R и физическими свойствами тела λ , но условиями теплопередачи $\alpha_{л+к}$, то одно и то же тело при нагреве в среде с низкой температурой (при малых значениях $\alpha_{л+к}$) может быть отнесено к «тонким», а при нагреве в среде с высокой температурой (при больших значениях $\alpha_{л+к}$) может оказаться «массивным» телом.

Продолжительность нагрева «тонких» заготовок при постоянной температуре печи можно определить по формуле:

$$\tau = \frac{S_p c \rho}{K_{\phi} \alpha_{л+к}} \ln \frac{t_{печ} - t_M^H}{t_{печ} - t_M^K}, \quad (3)$$

где S_p – расчетная толщина (радиус) заготовки; c – средняя теплоемкость металла; ρ – плотность металла; K_{ϕ} – коэффициент, зависящий от отношения объема тела к его поверхности (для пластины =1, для цилиндра =2, для шара =3); $\alpha_{л+к}$ – коэффициент теплоотдачи; $t_{печ}$ – температура печи; t_M^H , t_M^K – начальная и конечная температуры металла.

Продолжительность нагрева заготовок можно определить и по критериальной зависимости, которую можно выразить в следующей форме:

$$\frac{t_{печ} - t_M^K}{t_{печ} - t_M^H} = e^{-K_{\phi} Bi Fo}, \quad (4)$$

где Bi и Fo – критерии Био и Фурье.

Подставив в уравнение (4) выражение критерия Фурье $Fo = \frac{\alpha \tau}{S_p^2}$ и решив его относительно времени нагрева, получим:

$$\tau = \frac{S_p^2 \ln \left(\frac{t_{печ} - t_M^K}{t_{печ} - t_M^H} \right)}{\alpha Bi} \frac{1}{K_{\phi}}, \quad (5)$$

Имеются графики, построенные Д. В. Будриным, представляющие данную критериальную зависимость, т. е.

$$\Theta = \frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{М}}^{\text{К}}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{М}}^{\text{Н}}} = f(\text{Bi}; \text{Fo}),$$

Эти графики часто используют для определения продолжительности нагрева заготовок, см. приложение А.

Для определения продолжительности нагрева «массивных» тел пользуются формулой, выведенной из уравнения теплопроводности Фурье в предположение, что температура поверхности изменяется прямолинейно в зависимости от времени:

$$\tau = \frac{\Phi S_p^2}{\alpha \Delta t_{\text{М}}} (t_{\text{М}}^{\text{К}} - t_{\text{М}}^{\text{Н}}),$$

где Φ – коэффициент формы заготовки; S_p – расчетная толщина заготовки; α – температуропроводность металла; $t_{\text{М}}^{\text{К}}$ – $t_{\text{М}}^{\text{Н}}$ – начальная и конечная температуры металла; $\Delta t_{\text{М}}$ – конечная разность температур поверхности и центра нагреваемой заготовки в $^{\circ}\text{C}$, определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{М}} = \left[\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}^{\text{К}}}{100} \right)^4 \right] \frac{1}{0,6} \frac{S_p}{\lambda},$$

где $T_{\text{печ}}$ – температура печи; S_p – расчетная толщина заготовки; λ – коэффициент теплопроводности.

Для определения продолжительности нагрева в камерных печах с $t_{\text{печ}} = 1300^{\circ}\text{C}$ заготовок толщиной свыше 100мм с достаточной для практики точностью применяют формулу, предложенную Н. К. Доброхотовым:

$$\tau = \alpha_p K D \sqrt{D},$$

где α_p – коэффициент, учитывающий способ укладки заготовок на поду печи; K – коэффициент, учитывающий химический состав и равный 10 для конструкционной углеродистой и низколегированной стали и 20 – для высокоуглеродистой и высоколегированной стали; D – диаметр (толщина) заготовки.

Следует отметить, что расчет нагрева заготовок в печах с постоянной температурой можно вести по формулам для «тонких» тел, когда критерий Био не превышает 0,4 и по графикам Будрина – когда критерий Био больше 0,4.

Материалы, инструмент, оборудование.

Для выполнения работы необходимо иметь:

1. Электрическую камерную печь, в которой поддерживается постоянная температура.
2. Нагреваемые заготовки (сталь Ст3, диаметр =20, 40,60, 100, 120 мм и высота =100мм).
3. Термопары.
4. Приборы для измерения температуры (потенциометры, милливольтметр или пирометр).
5. Кузнечные клещи.

Термопары встроены в центре и на поверхности заготовки. Одна термопара введена в печь для измерения температуры печи.

Выполнение работы.

1. В нагретую до заданной температуры печь, поместить заготовки.
2. При разности температур центра заготовки и температуры печи в 40–50 °С измерения прекратить.
3. Построить кривые нагрева заготовок при заданной температуре рабочего пространства печи $t=f(\tau)$.
4. Вычислить критерий Био $Bi = \frac{\alpha_{ст+к} R}{\lambda}$.
5. Вычислить температурный критерий $\Theta = \frac{t_{опр} - t_{мас}}{t_{опр} - t_{печ}}$ (расчет вести по средней по массе температуре)
6. По графикам Д. В. Будрина определить критерий Фурье.
7. По полученным значениям критерия Фурье определить продолжительность нагрева заготовок.
8. Определить продолжительность нагрева заготовок по теоретическим формулам.

Расчеты опытов и вычислений поместить в таблицу.

Таблица

Материал и размер заготовок	$t_{печ}$	$t_{мас}$	$\tau_{оп, мин}$	Bi	Θ	Fo	$\tau_{кр}$	$\tau_{теор}$
	°С						мин	

Отчет о работе должен включать краткое содержание и цель работы, таблицу опытных данных, расчеты и графики, построенные по опытным данным.

Дать анализ полученных зависимостей.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Переводные коэффициенты между СИ (Международной системой единиц) и ранее применяемой системой МКГСС:

$$1 \text{ ккал} \approx 4,187 \text{ кДж}$$

$$1 \text{ ккал/м}^2 \approx 4,187 \text{ кДж/м}^2$$

$$1 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{°C)} \approx 4,187 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

$$1 \text{ ккал/(м}^3 \cdot \text{°C)} \approx 4,187 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)}$$

$$1 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C)} \approx 1,163 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$$

$$1 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C)} \approx 1,163 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$$

$$1 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)} \approx 1,163 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$1 \text{ кгс} = 9,8 \text{ Н}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Н/м}^2 = 133,3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Н/м}^2 = 9,81 \text{ Па}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Платинородий – платиновые ТП (тип ТПП 13) Номинальная статическая характеристика преобразователя R Зависимость термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) от температуры

Темпе- ратура рабочего конца	Т.э.д.с., мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,021	0,027	0,032	0,038	0,043	0,049
10	0,054	0,060	0,065	0,071	0,077	0,082	0,088	0,094	0,100	0,105
20	0,111	0,117	0,123	0,129	0,135	0,141	0,147	0,153	0,159	0,165
30	0,171	0,177	0,183	0,189	0,195	0,201	0,207	0,214	0,220	0,226
40	0,232	0,239	0,245	0,251	0,258	0,264	0,271	0,277	0,284	0,290
50	0,296	0,303	0,310	0,316	0,323	0,329	0,336	0,343	0,349	0,356
60	0,363	0,369	0,376	0,383	0,390	0,397	0,402	0,410	0,417	0,424
70	0,431	0,438	0,445	0,452	0,459	0,466	0,473	0,480	0,487	0,494
290	2,304	2,313	2,323	2,333	2,342	2,352	2,362	2,371	2,381	2,391
300	2,401	2,410	2,420	2,430	2,440	2,449	2,459	2,469	2,479	2,488
310	2,498	2,508	2,518	2,528	2,538	2,547	2,557	2,567	2,577	2,587
320	2,597	2,607	2,617	2,626	2,636	2,646	2,656	2,666	2,676	2,686
490	4,363	4,373	4,384	4,395	4,406	4,417	4,428	4,439	4,449	4,460
500	4,471	4,482	4,493	4,504	4,515	4,526	4,537	4,548	4,558	4,569
510	4,580	4,591	4,602	4,613	4,624	4,635	4,646	4,657	4,668	4,679
520	4,690	4,701	4,712	4,723	4,734	4,745	4,756	4,767	4,778	4,789
680	6,507	6,519	6,531	6,542	6,554	6,566	6,578	6,589	6,601	6,613
690	6,625	6,636	6,648	6,660	6,672	6,684	6,695	6,707	6,719	6,731
700	6,743	6,755	6,766	6,778	6,790	6,802	6,814	6,826	6,838	6,849
710	6,861	6,873	6,885	6,897	6,909	6,921	6,933	6,945	6,956	6,968
720	6,980	6,992	7,004	7,016	7,028	7,040	7,052	7,064	7,076	7,088
730	7,100	7,112	7,124	7,136	7,148	7,160	7,172	7,184	7,196	7,208
880	8,950	8,963	8,975	8,988	9,001	9,014	9,026	9,039	9,052	9,065
890	9,077	9,090	9,103	9,115	9,128	9,141	9,154	9,167	9,179	9,192
900	9,205	9,218	9,230	9,243	9,256	9,269	9,282	9,294	9,307	9,320
910	9,333	9,346	9,359	9,371	9,384	9,397	9,410	9,423	9,436	9,449
920	9,461	9,474	9,487	9,500	9,513	9,526	9,539	9,552	9,565	9,578

**Платинородий - платиновые ТП (тип ТПП13)
Номинальная статическая характеристика преобразователя R
Зависимость термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) от температуры**

Т.э.д.с., мкВ	Температура, °С для т.э.д.с., мкВ									
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
0	0,0	-9,7	-20,0	-31,0	-43,1					
0	0,0	9,2	18,1	26,6	34,8	42,8	50,5	58,1	65,5	72,7
500	79,8	86,8	93,6	100,3	107,0	113,5	120,0	126,3	132,6	138,9
1000	145,0	151,1	157,1	163,1	169,0	174,9	180,7	186,5	192,2	197,9
1500	203,6	209,2	214,7	220,3	225,8	231,2	236,7	242,1	247,5	252,8
2000	258,2	263,5	268,8	274,0	279,2	284,4	289,6	294,8	299,9	305,1
2500	310,2	315,3	320,3	325,4	330,4	335,4	340,4	345,4	350,4	355,3
3000	360,3	365,2	370,1	375,0	379,9	384,7	389,6	394,4	399,3	404,1
3500	408,9	413,7	418,4	423,2	428,0	432,7	437,4	442,2	446,9	451,6
4000	456,3	461,0	465,6	470,3	474,9	479,6	484,2	488,8	493,4	498,0
4500	502,6	507,2	511,8	516,4	520,9	525,5	530,0	534,5	539,1	543,6
5000	548,1	552,6	557,0	561,5	566,0	570,5	574,9	579,4	583,8	588,2
5500	592,6	597,1	601,5	605,9	610,2	614,6	619,0	623,4	627,7	632,1
6000	636,4	640,7	645,1	649,4	653,7	658,0	662,3	666,6	670,9	675,1
6500	679,4	683,7	687,9	692,1	696,4	700,6	704,8	709,0	713,3	717,5
9000	883,9	887,9	891,8	895,7	899,6	903,5	907,4	911,3	915,2	919,1
9500	923,0	926,9	930,7	934,6	938,5	942,3	946,2	950,0	953,8	957,7
10000	961,5	965,3	969,1	973,0	976,8	980,6	984,4	988,2	992,0	995,7

**Хромель – алюминиевая ТП (тип ТХА)
Номинальная статическая характеристика преобразователя К
Зависимость термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) от температуры**

Темпе- ратура рабочего конца °С	Т.э.д.с., мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571
280	11,382	11,423	11,465	11,506	11,547	11,588	11,630	11,671	11,712	11,753
290	11,795	11,836	11,877	11,919	11,960	12,001	12,043	12,084	12,126	12,167
300	12,209	12,250	12,291	12,333	12,374	12,416	12,457	12,499	12,540	12,582
310	12,624	12,665	12,707	12,748	12,790	12,831	12,873	12,915	12,956	12,998
320	13,040	13,081	13,123	13,165	13,206	13,248	13,290	13,331	13,373	13,415
450	18,516	18,558	18,601	18,643	18,686	18,728	18,771	18,813	18,856	18,898
460	18,941	18,983	19,026	19,068	19,111	19,154	19,196	19,239	19,281	19,324
470	19,366	19,409	19,451	19,494	19,537	19,579	19,622	19,664	19,707	19,750
480	19,792	19,835	19,877	19,920	19,962	20,005	20,048	20,090	20,133	20,175
490	20,218	20,261	20,303	20,346	20,389	20,431	20,474	20,516	20,559	20,602
500	20,644	20,687	20,730	20,772	20,815	20,857	20,900	20,943	20,985	21,028
510	21,071	21,113	21,156	21,199	21,241	21,284	21,326	21,369	21,412	21,454
520	21,497	21,540	21,582	21,625	21,668	21,710	21,753	21,796	21,838	21,881
530	21,924	21,966	22,009	22,052	22,094	22,137	22,179	22,222	22,265	22,307
680	28,289	28,332	28,374	28,416	28,458	28,500	28,542	28,584	28,626	28,668
690	28,710	28,752	28,794	28,835	28,877	28,919	28,961	29,003	29,045	29,087
700	29,129	29,171	29,213	29,255	29,297	29,338	29,380	29,422	29,464	29,506
710	29,548	29,589	29,631	29,673	29,715	29,757	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,090	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,685	36,725	36,765	36,805	36,845	36,885
890	36,925	36,965	37,006	37,046	37,086	37,126	37,166	37,206	37,246	37,286
900	37,326	37,366	37,406	37,446	37,486	37,526	37,566	37,606	37,646	37,686
910	37,725	37,765	37,805	37,845	37,885	37,925	37,965	38,005	38,044	38,084
920	38,124	38,164	38,204	38,243	38,283	38,323	38,363	38,402	38,442	38,482
930	38,522	38,561	38,601	38,641	38,680	38,720	38,760	38,799	38,839	38,878

**Хромель - алюмелевые ТП (тип ТХА)
Номинальная статическая характеристика преобразователя К
Зависимость термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) от температуры**

Т.э.д.с., мкВ	Температура, °С для т.э.д.с., мкВ									
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
0	0,0	1,3	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5	8,8	10,0	11,3
500	12,5	13,8	15,0	16,3	17,5	18,8	20,0	21,3	22,5	23,7
1000	25,0	26,2	27,5	28,7	29,9	31,2	32,4	33,6	34,8	36,1
10500	258,5	259,7	261,0	262,2	263,4	264,6	265,8	267,1	268,3	269,5
11000	270,7	271,9	273,2	274,4	275,6	276,8	278,0	279,2	280,5	281,7
11500	282,9	284,1	285,3	286,5	287,7	288,9	290,1	291,4	292,6	293,8
12000	295,0	296,2	297,4	298,6	299,8	301,0	302,2	303,4	304,6	305,8
12500	307,0	308,2	309,4	310,6	311,8	313,0	314,2	315,4	316,6	317,8
13000	319,0	320,2	321,4	322,6	323,8	325,0	326,2	327,4	328,6	329,8
13500	331,0	332,2	333,4	334,6	335,8	337,0	338,2	339,4	340,6	341,8
19000	461,4	462,6	463,7	464,9	466,1	467,3	468,4	469,6	470,8	472,0
19500	473,1	474,3	475,5	476,7	477,8	479,0	480,2	481,4	482,5	483,7
20000	484,9	486,1	487,2	488,4	489,6	490,8	491,9	493,1	494,3	495,4
20500	496,6	497,8	499,0	500,1	501,3	502,4	503,6	504,8	506,0	507,1
21000	508,3	509,5	510,7	511,8	513,0	514,2	515,4	516,5	517,7	518,9
21500	520,1	521,2	522,4	523,6	524,8	525,9	527,1	528,3	529,5	530,6
22000	531,8	533,0	534,2	535,3	536,5	537,7	538,9	540,0	541,2	542,4
22500	543,5	544,7	545,9	547,1	548,2	549,4	550,6	551,8	552,9	554,1
27000	649,4	650,6	651,8	652,9	654,1	655,3	656,5	657,7	658,9	660,0
27500	661,2	662,4	663,6	664,8	666,0	667,2	668,3	669,5	670,7	671,9
28000	673,1	674,3	675,5	676,7	677,8	679,0	680,2	681,4	682,6	683,8
28500	685,0	686,2	687,4	688,6	689,7	690,9	692,1	693,3	694,5	695,7
29000	696,9	698,1	699,3	700,5	701,7	702,9	704,1	705,3	706,5	707,7
29500	708,8	710,0	711,2	712,4	713,6	714,8	716,0	717,2	718,4	719,6
30000	720,8	722,0	723,2	724,4	725,6	726,8	728,0	729,2	730,4	731,6
35500	854,6	855,9	857,1	858,3	859,6	860,8	862,1	863,3	864,5	865,8
36000	867,0	868,3	869,5	870,7	872,0	873,2	874,5	875,7	876,9	878,2
36500	879,4	880,7	881,9	883,2	884,4	885,6	886,9	888,1	889,4	890,6
37000	891,9	893,1	894,4	895,6	896,9	898,1	899,4	900,6	901,9	903,1
37500	904,4	905,6	906,9	908,1	909,4	910,6	911,9	913,1	914,4	915,6
38000	916,9	918,1	919,4	920,7	921,9	923,2	924,4	925,7	926,9	928,2
38500	929,5	930,7	932,0	933,2	934,5	935,8	937,0	938,3	939,5	940,8
39000	942,1	943,3	944,0	945,9	947,1	948,4	949,6	950,9	952,2	953,4

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Основные характеристики огнеупорных материалов (Т-273)=В

Огнеупорный материал	Объемная масса, кг/м ³	Огнеупорность, К	Температура размягчения под нагрузкой, К	Теплоемкость кДж/(кг×К), при температуре Т(К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×°С), при температуре Т(К)
Динас	1900-1950	1980-2030	1890-1970	0,837+ 0,25×В	0,93+0,7×В
Шамот	1800-1900	1880-2000	1570-1670	0,88+ 0,23×В	0,835+0,58×В
Силлиманит и муллит	2200-2400	2050-2120	1770-1880	0,837+ 0,25×В	1,68-0,23×В
Корунд (алунд)	2600-2900	2070-2270	1850-2120	0,795+ 0,42×В	2,1+1,85×В
Магнезит	2600-2800	2270	1770-1870	1,05+ 0,29×В	4,65+1,75×В
Цирконий	3300	2870	1820-1870	0,535+ 0,13×В	1,3+0,64×В
Карборунд	2300-2600	2270-2470	1970-2070	0,965+ 0,15×В	21-10,5×В
Графит	1600	3270	2270	0,837	163-40,7×В

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Средняя теплоемкость кДж/(кг*К) углеродистых и низколегированных сталей

Температура, К	Углеродистые стали	Низколегированные стали	Температура, К	Углеродистые стали	Низколегированные стали
373	0,486	0,486	1073	0,695	0,695
473	0,507	0,503	1173	0,695	0,686
573	0,524	0,520	1273	0,691	0,675
673	0,536	0,536	1373	0,687	0,670
773	0,561	0,549	1473	0,683	0,670
873	0,591	0,586	1573	0,683	-
973	0,620	0,645			

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Теплопроводность, Вт/(м*К), углеродистых и низколегированных сталей

Температура, К	Углеродистые стали			Хромистые стали 0,7-1,1% Cr	Низколегированные стали					
	0,05-0,2% C	0,20-0,5% C	0,6-1,3% C		1,2-1,8% Mn	1,3-1,6% Cr 1,0-1-6% Si	1,1-1,4% Si 1,1-1-4% Mn	0,8-1,3% Cr 0,15-0,55% Mo	0,8-1,1% Cr 0,1-0,2% V	0,45-0,9% Cr 1,0-3,15% Ni
373	55,6	49,3	46,6	44,8	41,8	–	41,6	43,9	52,4	38,4
473	52,8	48,2	44,0	42,3	40,1	38,8	41,6	41,9	48,7	37,9
573	48,0	45,6	40,8	39,3	38,9	–	39,4	41,4	–	36,8
673	45,0	42,5	37,7	36,4	37,0	36,0	39,0	39,4	45,4	36,8
773	40,8	39,1	35,0	–	35,3	33,5	36,3	36,6	41,9	34,8
873	37,1	36,9	32,4	32,6	34,330,8	32,6	34,9	32,4	–	32,5
973	34,2	32,5	29,2	–	26,4	–	33,8	29,8	–	28,1
1073	30,1	26,2	24,1	26,7	–	26,8	32,6	29,1	–	27,1
1173	27,4	26,1	25,3	–	–	–	–	28,5	–	26,4
1273	27,9	26,9	26,5	–	–	–	–	–	–	27,7
1373	28,5	28,1	27,9	–	–	–	–	–	–	28,9
1473	29,8	29,6	29,5	–	–	–	–	–	–	–

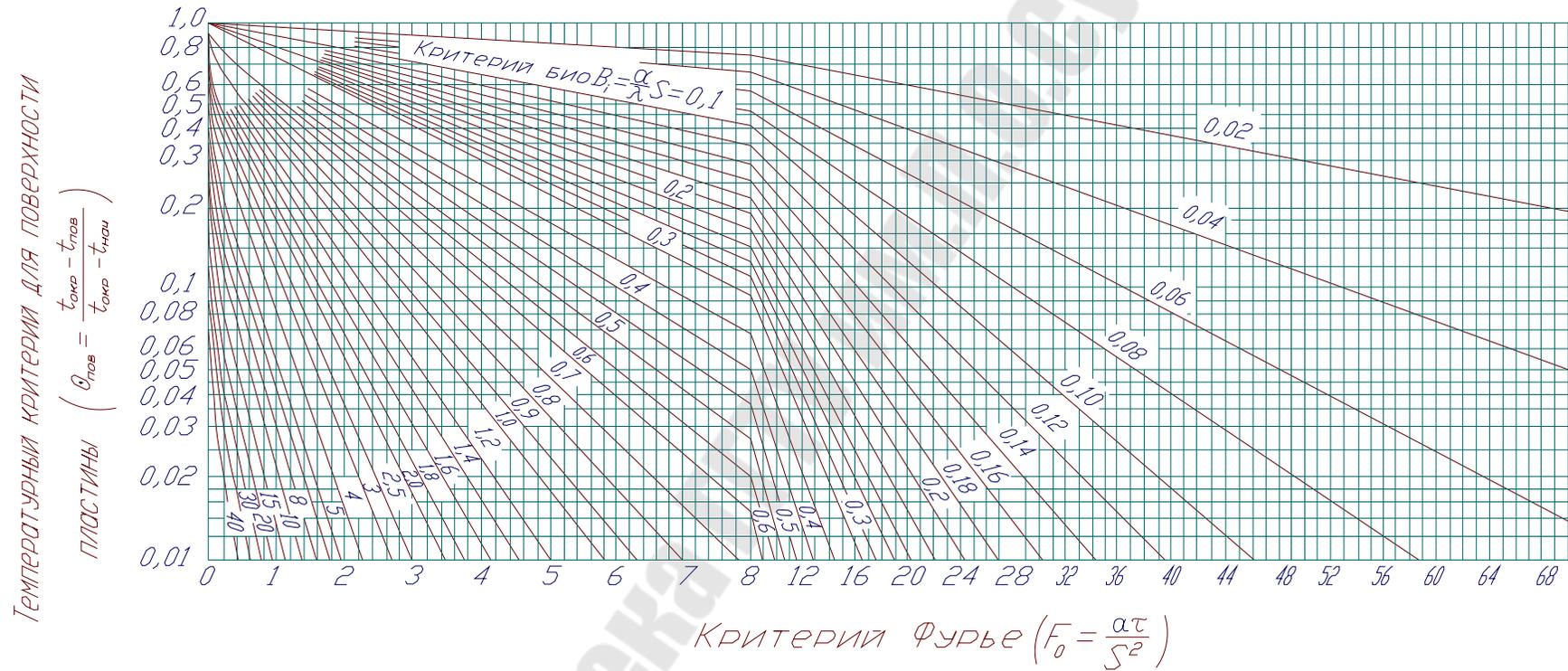


График функции $f(Bi; F_0)$ и $f'(Bi; F_0)$ для расчёта температуры поверхности пластины при нагреве в среде с постоянной температурой (по Д. В. Будрину)

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КРИТЕРИЙ ДЛЯ СЕРЕДИНЫ

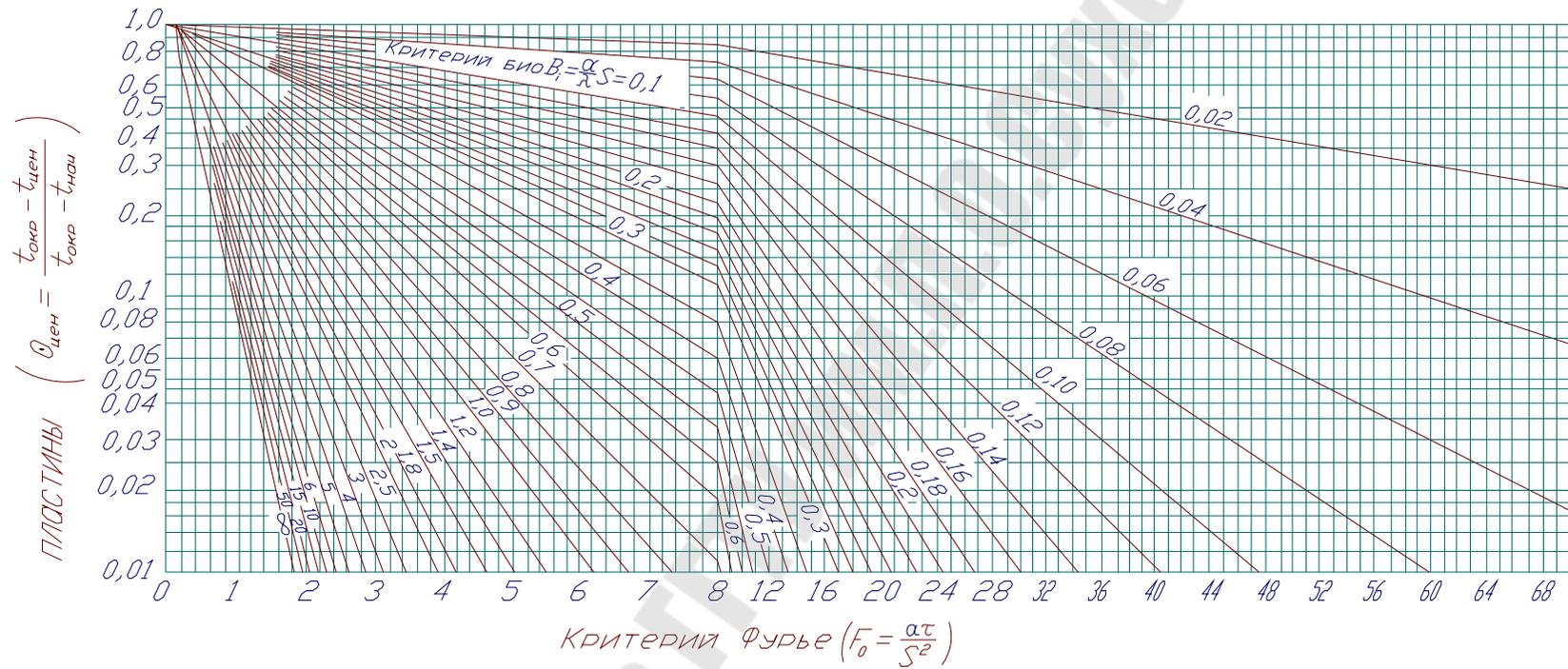


График функции $f(Bi; Fo)$ и $f'(Bi; Fo)$ для расчёта температуры центра пластины при нагреве в среде с постоянной температурой (по Д. В. Будрину)

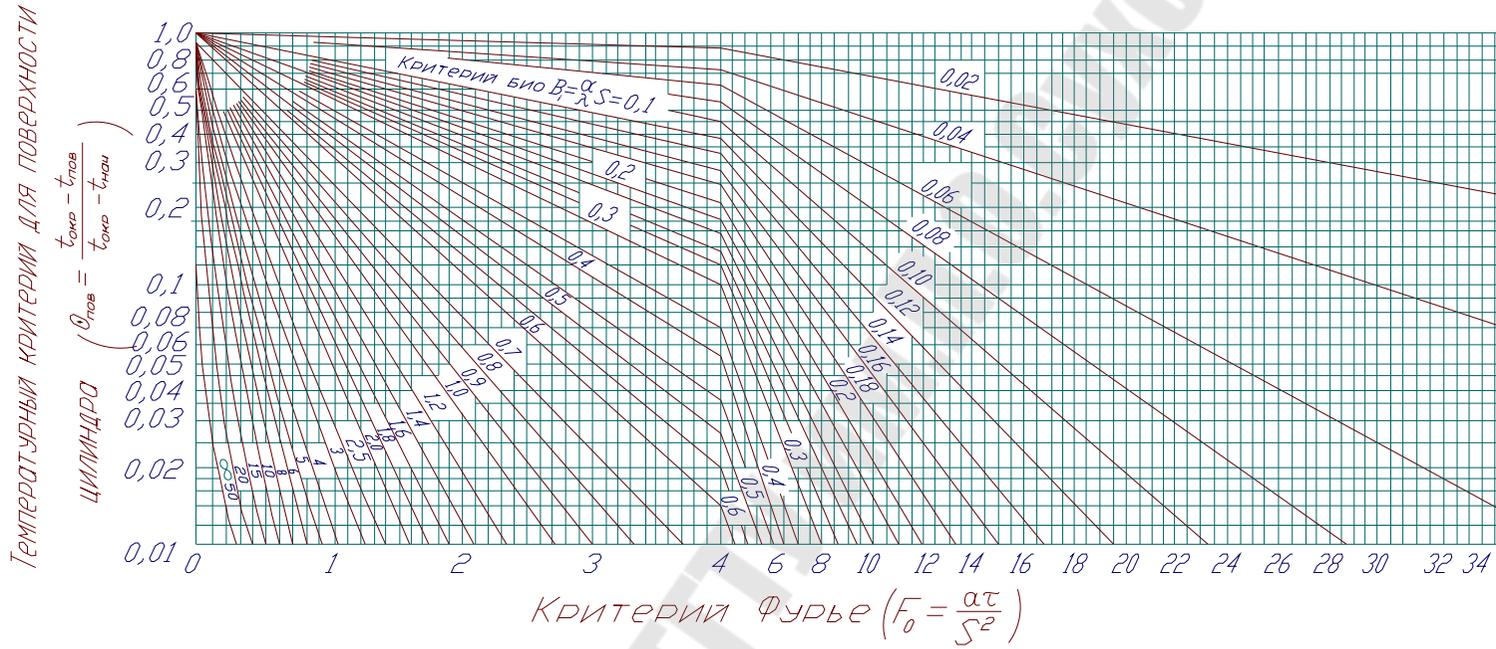


График функции $f(Bi; Fo)$ и $f'(Bi; Fo)$ для расчёта температуры поверхности цилиндра при нагреве в среде с постоянной температурой (по Д. В. Будрину)

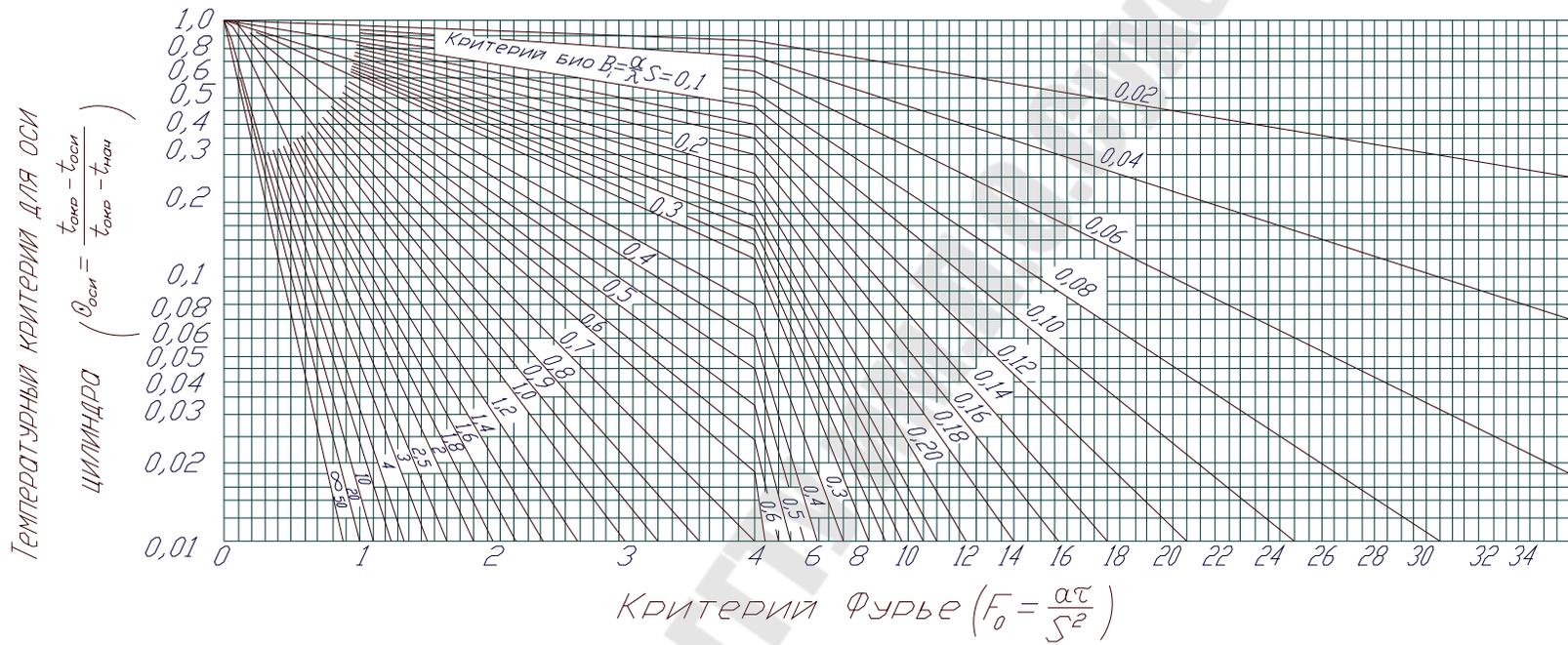


График функции $f(Bi; F_0)$ и $f'(Bi; F_0)$ для расчёта температуры центра цилиндра при нагреве в среде с постоянной температурой (по Д. В. Будрину)

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1 Контроль режима нагрева печи прибором автоматического регулирования КСП4.	3
Лабораторная работа № 2 Преобразователи термоэлектрические. Методы и средства поверки.....	13
Лабораторная работа № 3 Передача тепла через стенки печи при стационарном режиме ее работы.	26
Лабораторная работа № 4 Определение коэффициента теплоотдачи при охлаждении металла.	31
Лабораторная работа № 5 Нагрев твердых тел.....	38
Лабораторная работа № 6 Изучение процесса нагрева заготовок и деталей в камерных печах при постоянной температуре печи.	43
Приложения	48

Валицкая Ольга Михайловна

**РАСЧЕТЫ И КОНСТРУКЦИИ
НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Лабораторный практикум
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-36 01 05
«Машины и технология обработки
материалов давлением»**

Подписано в печать **22.06.09.**

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,1.

Изд. № 19.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.