**Лабораторная работа № 9**

**Автоматизация контроля температуры в камерных печах**

**Цель работы:** изучение основных принципов действия систем автоматического регулирования температуры , возможностей и способов включения датчиков для контроля температуры, вторичных приборов, регулирующих и исполнительных органов.

1. **Краткие теоретические сведения**

**1.1 Датчики температуры и измерительные приборы**

Температура – это условная статистическая величина, прямо пропорциональная средней кинетической энергии элементарных частиц вещества (молекул или атомов).

Для измерения температуры обычно используют изменение какого-либо физического свойства тела, однозначно зависящего от температуры и легко поддающегося измерению. К числу свойств, положенных в основу работы приборов для измерения температуры, относятся: объёмное расширение тел, изменение давления вещества в замкнутых объемах, возникновение термоэлектродвижущей силы, изменение электрического сопротивления проводников и полупроводников, интенсивность излучения нагретых тел и т.д.

Существуют контактные и бесконтактные методы измерения температуры. В первом случае имеет место надежный тепловой контакт чувствительного элемента прибора с объектом измерения. Во втором случае нет непосредственного контакта чувствительного элемента прибора с объектом измерения.

**Приборы для измерения температуры контактным способом**

**Термометры расширения.** Принцип действия термометров расширения основан на изменении объема жидкости или линейных размеров твердых тел при изменении температуры. Применяются для местных измерений температур в пределах от –200 до +750 оС. Погрешность измерения ±1%. Одним из представителей этой группы является жидкостный стеклянный термометр расширения. Принцип действия термометра основан на зависимости между температурой и объемом термометрической жидкости, заключенной в стеклянной оболочке. Наиболее широко в качестве термометрической жидкости используется ртуть. Применяют также органические заполнители: толуол, этиловый спирт, керосин и т.п. Ртуть по сравнению с другими жидкостями обладает следующими преимуществами:

– не смачивает стекла;

– легко получается в химически чистом виде;

– при нормальном атмосферном давлении в широком интервале температур (от -38,86 до 358,70 оС) остаётся жидкой;

– имея малую теплоёмкость, при нагревании почти не даёт инерционных запаздываний. Недостатками ртути являются сравнительно небольшой температурный коэффициент расширения и осторожность при обращении с ней. Коэффициент расширения ртути β″0-100 = 18⋅10-5 о С-1.

**Манометрические термометры**

Принцип действия манометрического термометра основан на использовании зависимости между температурой и давлением термометрического вещества (газа, жидкости), заполняющего герметически замкнутую термосистему термометра.



**Рисунок 1. Манометрический термометр**

Принципиальная схема показывающего манометрического термометра приведена на рис.1 Термосистема состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической одно или много витковой пружины 6. Капилляр соединяет термобаллон с неподвижным концом манометрической пружины. Подвижный конец пружины запаян и через шарнирное тягу 3, трибко-секторный механизм 7

связан со стрелкой прибора 5. При погружении термобаллона в среду, температура которой измеряется, изменяется давление термометрического вещества в замкнутой термосистеме, чувствительный элемент которой (манометрическая пружина) деформируется и её свободный конец перемещается. Данное изменение положения пружины преобразуется в соответствующее перемещение регистрирующей стрелки относительно шкалы прибора 5. Поперечное сечение манометрической пружины, выполненной в виде полой металлической (сталь, латунь, бронза) изогнутой трубки, либо овальное, либо сложной формы с пережатым средним участком и двумя каналами каплевидной формы, что повышает её механическую прочность, уменьшает внутренний объём и снижает дополнительную температурную погрешность, связанную с изменением температуры окружающей среды.

Манометрические термометры просты по устройству, надежны в работе при отсутствии электропривода диаграммы – взрыво- и пожаробезопасны. С помощью этих приборов можно измерять температуру в диапазоне от –150 до 600 оС. Класс точности – 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Для работы со вторичными приборами изготавливают манометрические термометры с электрическими или пневматическими преобразователями. Различают газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные) манометрические термометры. Устройства манометрических термометры всех типов аналогичны.

Приборы изготавливаются различных модификаций: показывающие, самопишущие, с сигнальными и регулирующими устройствами, а также с выходными унифицированными сигналами для включения в систему автоматического контроля и регулирования. На показания манометрических термометров значительное влияние оказывают внешние условия: изменение температуры окружающего воздуха (дополнительная температурная погрешность), различная высота расположения термобаллона и пружины (гидростатическая погрешность), колебания атмосферного давления (барометрическая погрешность).

**Термопреобразователь сопротивления (ТС**) представляет собой измерительный преобразователь с чувствительным элементом, который под воздействием температуры изменяет активное сопротивление электрическому току. Термометры сопротивления применяют в тех случаях, когда требуется повышенная точность измерений в пределах от –200 до +650 оС. Верхний температурный предел обусловлен механической и химической стойкостью материала, из которого изготовлено сопротивление. Изменение электросопротивления данного материала при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом сопротивления α (1/°С), который определяется по формуле:

***α = (Rt – R0)/(R0·t),*  (1)**

где *t* – температура материала, ºС; *R0, Rt*– электросопротивление при 0 ºС и при температуре *t*, Ом.

Этот коэффициент должен быть постоянным в широком интервале температур.

В комплект ТС входят чувствительный элемент, соединительные провода, источник питания и прибор, измеряющий активное сопротивление и проградуированный в единицах измерения температуры. Чувствительный элемент ТС может быть выполнен из проводникового или полупроводникового материала. Недостатками термометров сопротивления являются: необходимость источника питания, значительная инерционность, измерение температуры не в точке, а в определенном объеме.

Технические термометры (тип ТСП) чаще всего выполняются в конструктивной форме, показанной на рис. 2.

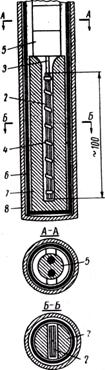
http://www.physicexperts.ru/images/books/607/image016.jpgб)

Рисунок 2. **Конструктивная схема платиновых тер­мометров сопротивле­ния: а — схема бифилярной на­мотки проволоки / на слю­дяную пластинку 2; б—чув­ствительный элемент тер­мометра в арматуре**

Неизолированную платиновую проволоку 1 диаметром 0,07 мм бифилярно наматывают на слюдяную пластинку 2 с зубчатыми краями. Бифилярная намотка необхо­дима для того, чтобы исключить появле­ние индуктивного сопротивления. Пла­стинка с намотанной на ней платиновой проволокой покрывается с двух сторон слюдяными пластинками таких же разме­ров. Все три пластинки скрепляются се­ребряной лентой 4 в пакет. К каждому концу платиновой проволоки приварива­ется подводящий провод 3 из серебра диаметром 1 мм. Подводящие провода изолируются фарфоровыми бусами 5 и присоединяются к зажимам на головке термометра. Такой чувствительный эле­мент помещают в тонкостенную алюми­ниевую трубку 6, в нижней части которой расположен массивный вкладыш 7 с плоской прорезью для чув­ствительного элемента. Вкладыш улучша­ет условия теплопередачи от трубки к чувствительному элементу. Алюминие­вую трубку вместе с подводящими прово­дами помещают во внешний защитный чехол 8, выполняемый обычно из сталь­ной трубы. Внешний вид и размеры термометров такие же, как и у термоэлектрических термометров. Длина чувст­вительного элемента во всех конструк­циях обычно не меньше 90—100 мм.

**Термоэлектрические преобразователии или термопары** - это термоэлектрические контактные датчики, которые состоят из двух разных по физическим свойствам проводников и соединений этих проводников (пар). Термопары не требуют внешнего источника питания и сами вырабатывают напряжение в зависимости от изменения температуры. Это надежные и недорогие датчики температуры, широко используемые в различных измерительных системах. Термопары являются единственными температурными датчиками, позволяющими измерять сверхвысокие температуры (до +2300°С). Кроме того, термопары имеют высокую линейность и точность измерений.

Принцип действия термопары основан на явлении возникновения контактной разности потенциалов при соприкосновении двух различных металлов. Причиной этого являются неодинаковые значения работ выхода электронов и различные значения концентрации свободных электронов в соприкасающихся металлах.

Термопара состоит из двух металлов, сваренных на одном конце. Эта часть ее помещается в месте замера температуры. Два свободных конца подключаются к измерительной схеме (милливольтметру).

Если спай двух металлов А и В (термопара) имеет температуру *T1,* а свободные (неспаянные) концы темпера­туру *T2*, причем *T1>T2,* то между свободными концами возникает термоЭДС:

**, (2)

где – коэффициент термоЭДС или относительная удельная термоЭДС, k – постоянная Больцмана, е – заряд электрона, n1, n2 – концентрации свободных электронов в соприкасающихся металлах.

Наиболее распространены термопары платино-платинородиевые (ПП), хромель-алюминиевые (ХА), хромель-копелевые (ХК), железоконстантовые (ЖК), алюмелевые. Термопары пригодны для измерения температур в диапазоне от 0 до 2300°C, и в области низких температур до -200°C.

Схемы подключения термопар к измерительному прибору показаны на рис.3. В реальной практике в большинстве случаев используют вторую схему, где измерительный прибор включается в разрыв одного из термоэлектродов. Подобное подключение позволяет компенсировать ненужную термоЭДС, возникающую в точках подключения термоэлектродов к проводам, ведущим к прибору. Эти точки в случае первой схемы хотя и находятся при одинаковой температуре, но соединяют разные по физическим свойствам проводники (например, медь-железо и медь-константан, если соединительные провода медные), в результате чего в них может возникать дополнительная нескомпенсированная термоЭДС, влияющая на результаты измерения. Термопара на основе такой схемы подключения называется дифференциальной.

Следует отметить, что схема подключения может содержать и большее количество спаев, чем два. Такие схемы могут использоваться для измерения, например, средней температуры объекта по нескольким точкам замера.

Для расчета суммарной термоЭДС в цепи дифференциальной термопары необходимо знать как минимум температуру одного из спаев. Раньше холодные спаи опускались в сосуды с тающим льдом для поддержания их температуры, равной 0°C (отсюда появилось название «холодные спаи»), но это очень неудобно, а для многих практических схем и вовсе невозможно. Сейчас обычно температура холодного спая контролируется дополнительным детектором (например, терморезистором).

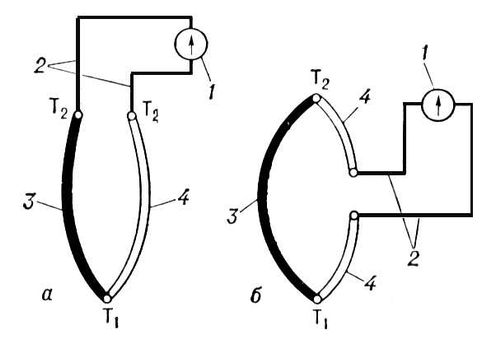


Рисунок 3. **Способы подключения термопары**

В качестве измерительных приборов ТС применяют уравновешенные (неуравновешенные) мосты и логометры. Автоматические уравновешенные мосты широко используются для измерения и регистрации температуры в комплекте с ТС, а также других параметров, изменения, значения которых могут быть преобразованы в изменение активного сопротивления. Их характеризуют высокая точность и возможность использования в системах автоматического регулирования. Они выпускаются различных модификаций одно- и многоточечные, с дисковой иленточной диаграммой, с дисковой и ленточной диаграммой, сигнальными устройствами и др.

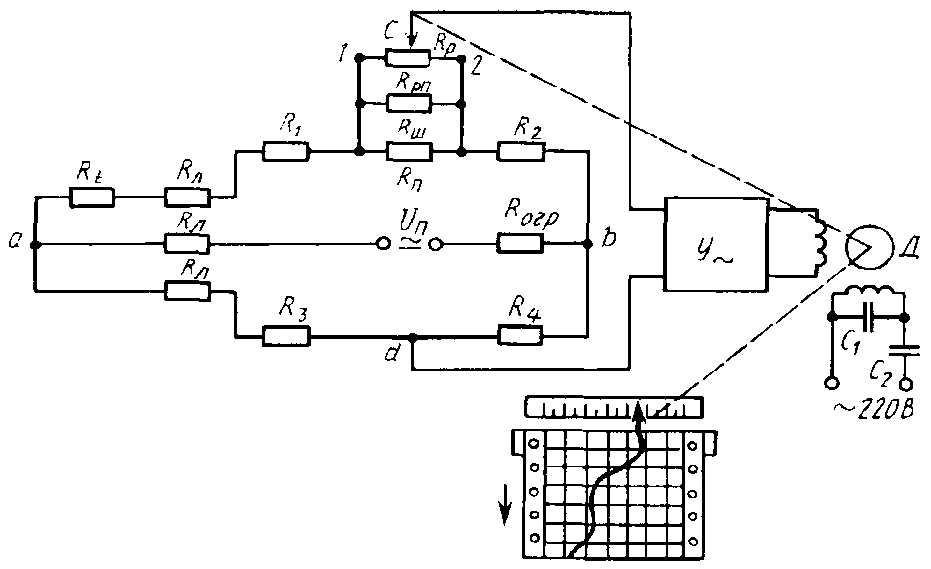


Рисунок 4.**Принципиальная схема автоматического моста для измерения температуры.**

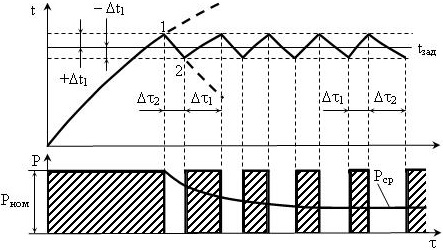
В автоматических уравновешенных мостах используется четырехплечная мостовая схема. На рис. 4 обозначены R1, R2, R3, R4 – сопротивления плеч моста; Rt – терморезистор; Rл – сопротивление линии (место измерения температуры может находиться на значительном расстоянии от прибора); Rрп – полное сопротивление реохорда; Rп – сопротивление, определяемое пределом измерения моста; Uп – напряжение источника питания; Rогр – сопротивление, ограничивающее ток в плечах мостовой схемы.

К основным свойствам схемы автоматического уравновешенного моста, показанной на рис. 4, относятся: высокая чувствительность; компенсация влияния температурных изменений сопротивлений соединительных проводов (Rл); возможность расширения пределов измерения шунтированием реохорда сопротивлением Rп (без потери линейности шкалы).

Автоматические мосты, выполненные по схеме рис. 4, имеют уменьшенное влияние внешних наводок (третий соединительный провод входит в диагональ источника питания, а не в усилитель).

Самонагрев термометра устраняется соответствующим выбором Rогр (для устранения погрешности от самонагрева ток в термометре не должен превышать 7 – 8 мА). Нестабильность переходного сопротивления контакта движка реохорда не вносит погрешности в измерения, так как оно включено последовательно с большим по величине входным сопротивлением усилителя. Термо- и контактная ЭДС устраняются при питании схемы моста переменным напряжением.

**1.2. Автоматическое регулирование температуры**

В печах сопротивления в подавляющем большинстве случаев применяется простейший вид регулирования температуры - двухпозиционное регулирование, при ко­тором исполнительный элемент системы регулирова­ния – контактор имеет лишь два крайних положения: «включено» и «выключено». Во включенном состоянии температура печи растет, так как ее мощность всегда выбирается с запасом, и соответствующая ей установив­шаяся температура значительно превосходит ее рабочую температуру. В выключенном состоянии температура пе­чи снижается по экспоненциальной кривой. Для идеали­зированного случая, когда в системе регулятор - печь отсутствует динамическое запаздывание, работа двухпозиционного регулятора показана на рисунке 4, на кото­ром в верхней части дана зависимость температуры пе­чи от времени, а в нижней - соответствующее изменение ее мощности. При разогреве печи вначале ее мощность будет постоянной и равной номинальной, поэтому ее температура будет расти до точки 1, когда она достиг­нет значения tзад**+ ∆**t1, где ⎢+**∆**t ⎢+ ⎢–**∆**t ⎢– зона  не­чувствительности регулятора. В этот момент регулятор сработает, контактор отключит печь и ее мощность упа­дет до нуля. Вследствие этого температура печи начнет уменьшаться по кривой 1 – 2 до тех пор, пока не будет достигнута нижняя граница зоны нечувствительности tзад**– ∆**t2. В этот момент произойдет новое включение печи, и ее температура вновь начнет увеличиваться.  
  
  
  
  
Рисунок 5.  **Идеализированная схема работы двухпозиционного регулятора температуры**

Таким образом, процесс регулирования температуры печи по двухпозиционному принципу заключается в ее изменении по пилообразной кривой около заданного значения в пределах интервалов **+ ∆**t1, **– ∆**t2 определяе­мых зоной нечувствительности регулятора. Средняя мощность печи зависит от соотношения интервалов вре­мени ее включенного состояния Δτ1 и выключенного со­стояния Δτ2. По мере прогрева печи и загрузки кривая нагрева печи будет идти круче, а кривая остывания пе­чи – положе, поэтому отношение периодов цикла Δτ1 и Δτ2 будет уменьшаться, а следовательно, будет падать и средняя мощность Рср. При двухпозиционном регули­ровании средняя мощность печи все время приводится в соответствие с мощностью, необходимой для поддержания постоянной температуры. Зона нечувствительности современных терморегуля­торов может быть сделана весьма малой и доведена до 0,1 ÷ 0,2 °С. Однако действительные колебания темпера­туры печи могут быть во много раз большими из-за динамического запаздывания в системе регулятор - печь. Основным источником этого запаздывания является инер­ция датчика - термопары, особенно если она снабжена двумя защитными чехлами: керамическим и металличе­ским. Чем больше это запаздывание, тем больше коле­бания температуры нагревателя превышают зону нечув­ствительности регулятора. Кроме того, амплитуды этих колебаний очень сильно зависят от избытка мощности печи. Чем больше мощность включения печи превышает среднюю мощность, тем больше эти колебания.  
Колебания температуры нагревателей при двухпозиционном регулировании велики, так как масса и тепло­вая инерция нагревателей сравнительно малы. В других расположенных в камере печи элементах колебания температуры меньше, особенно у теплотехнически мас­сивных тел, у которых падающий на поверхность тепло­вой поток, излучаемый нагревателями, интенсивно по­глощается телом, что ограничивает повышение темпера­туры поверхности. Вследствие этого теплотехнически массивная загрузка печи не испытывает значительных колебаний температуры. Однако колебания температуры загрузки значительны и вредны, если эта загрузка теплотехнически тонкая, например тонкая лента или проволока. Так, в протяжных печах для нагрева ленты или проволоки при двухпозиционном регулировании бу­дет наблюдаться неравномерный (полосатый) нагрев. При больших скоростях одни участки ленты пройдут че­рез печь в период, когда ее нагреватели будут включе­ны, другие – вовремя их отключения; ясно, что первые участки в результате будут нагреты больше, чем вторые.  
Для того чтобы свести до минимума такие колебания температуры загрузки, необходимо повысить чувстви­тельность регулирующего прибора, уменьшить инерцию (постоянную времени) датчика и запас мощности. Как уже говорилось, чувствительность современных автома­тических потенциометров очень высока и может удовлет­ворить любые требования. Инерция датчика, наоборот, велика. Так, стандартная термопара в фарфоровом на­конечнике с защитным чехлом имеет запаздывание око­ло 20 ÷ 60 с. Поэтому в тех случаях, когда колебания температуры недопустимы, в качестве датчиков приме­няют незащищенные термоэлементы с открытым концом. Это, однако, не всегда возможно ввиду возможных ме­ханических повреждений датчика, а также попадания в приборы через термоэлемент токов утечки, вызываю­щих неправильную их работу. Можно достичь уменьше­ния запаса мощности, если печь не включать и выклю­чать, а переключать с одной ступени мощности на дру­гую, причем высшая ступень должна быть лишь нена­много больше потребляемой печью мощности, а низ­шая – ненамного меньше. В этом случае кривые нагре­ва печи и ее остывания будут очень пологими, а температура почти не будет выходить за пределы зоны нечув­ствительности прибора. Для того чтобы осуществить такое переключение с одной ступени мощности на другую, необходимо иметь возможность плавно или ступенями регулировать мощ­ность печи. Такое регулирование может быть осуществлено одним из следующих способов:  
- переключением нагревателей печи, например, с «треугольника» на «звезду». Такое весьма грубое регу­лирование связано с нарушением равномерности темпе­ратуры и применяется лишь в бытовых электронагревательных приборах;  
- включением последовательно с печью регулируемо­го активного или реактивного сопротивления. Этот спо­соб связан с очень большими потерями энергии или сни­жением коэффициента мощности установки;  
- питанием печи через регулировочный трансформа­тор или автотрансформатор с переключением печи на разные ступени напряжения. Здесь регулирование также ступенчатое и сравнительно грубое, так как регулирует­ся питающее напряжение, а мощность печи пропорцио­нальна квадрату этого напряжения. Кроме того, имеют место дополнительные потери (в трансформаторе) и сни­жение коэффициента мощности;  
- фазовым регулированием с помощью полупроводни­ковых приборов. В этом случае питание печи осущест­вляется через тиристоры, угол включения которых изме­няется системой управления. Таким путем можно полу­чить плавное регулирование мощности печи в широких пределах почти без дополнительных потерь, используя непрерывные методы регулирования -  пропорциональ­ный, интегральный, пропорционально-интегральный. В соответствии с этими методами для каждого момента времени должно выполняться соответствие поглощаемой печью мощности и мощности, выделяемой в печи.

Приборное оформление, настройка и эксплуатация, систем непрерывного автоматического регулирования температурного режима намного сложнее, чем при по­зиционном методе. Кроме того, всякие изменения этой мощности (открытие дверцы, повышенные потери, изменение параметров нагреваемых деталей в печах непрерывного действия) вызывают колебательные переходные режимы, в течение которых меняется и регулируемая температура.

1. **Методика выполнения работы**

Работа проводится на базе лабораторной печи **SNOL 6,7/1300,** принципиальная электрическая схема которой приведена на рис.6.

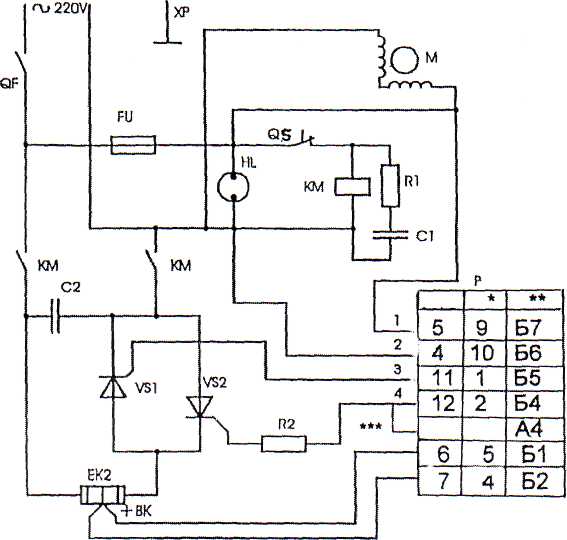


Рисунок 6. **Схема электрическая принципиальная(SNOL 6,7/1300)**

FU-вставка плавкая (1А); QF- автом. выключатель; R1.R2-резистор; QS-микровыключатель; ЕК2-нагревательный элемент; ХР-шнур армированный; VS1,VS2- тиристор; HL-индикатор; КМ-пускатель электромагнитный; С1,С2-конденсатор; М-вентилятор; Р-регулятор температуры OMRON E5CK-T (или E5CN, ТП-303, ТП-300); ВК- термопора типа "S".

(\*для регулятора E5CN; \*\*для регулятора ТП-303, ТП-300; \*\*\*перемычка А4-В4 только для регулятора ТП-300)

Работу необходимо выполнять в следующей последовательности :

а) ознакомиться с устройством, электрической схемой и принципом работы печи **SNOL 6,7/1300;**

б) подать напряжение на лабораторную печь **SNOL 6,7/1300,** включив выключатель QF, при этом загорится сигнальная лампа HL;  
в) задать температуру нагрева печи 1000 оС;

г) фиксировать время нагрева через каждые 100оС (100, 200, 300 и т.д.) вплоть до достижения заданной температуры, данные занести в таблицу 1;

д) после достижения заданной температуры фиксировать время нахождения печи во включенном состоянии τвкл и в выключенном τвыкл  а также показатели максимальной Тmax и минимальной температур Tmin в течение 10 циклов, значения времени и температуры занести в таблицу 2;

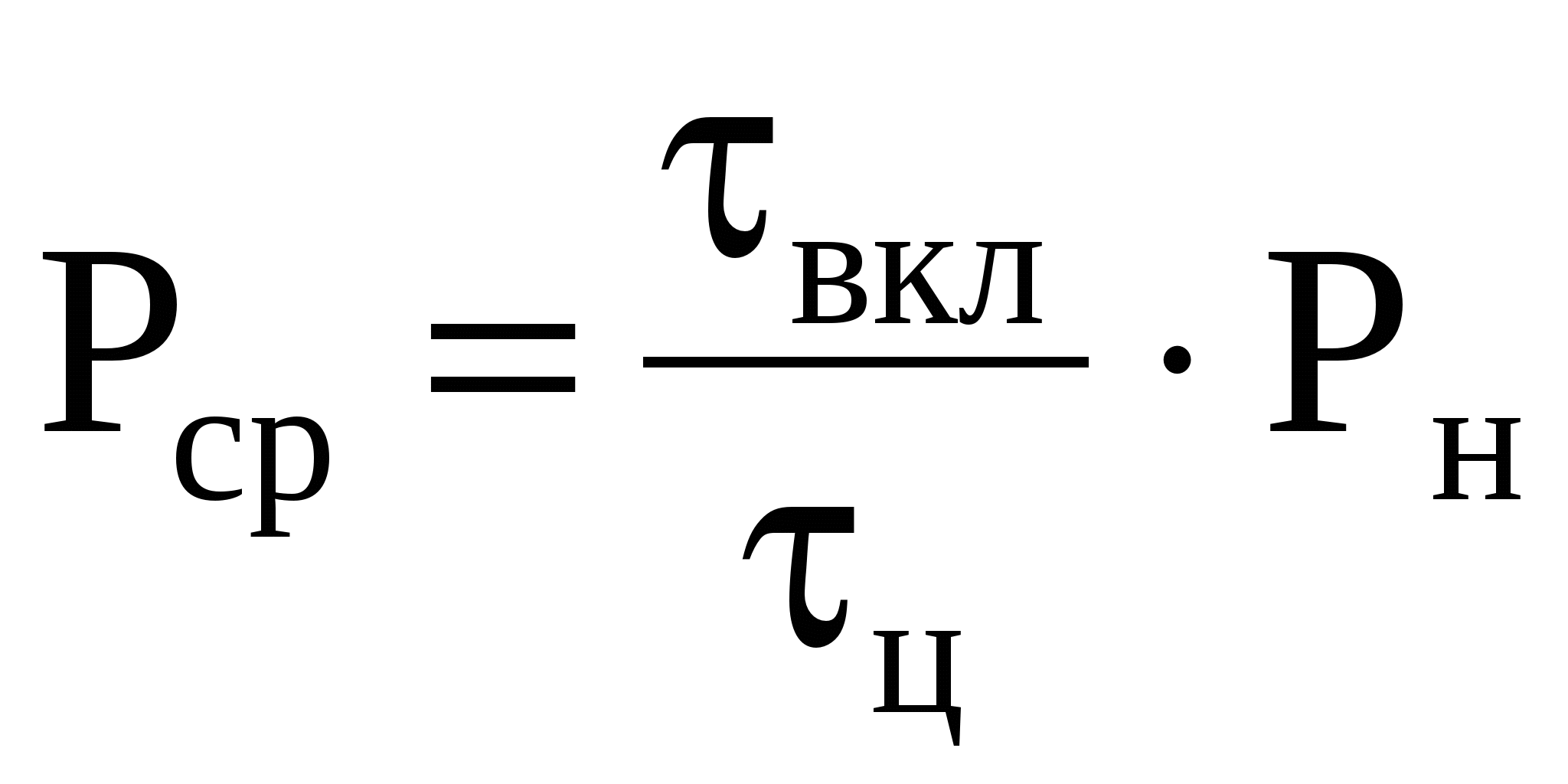
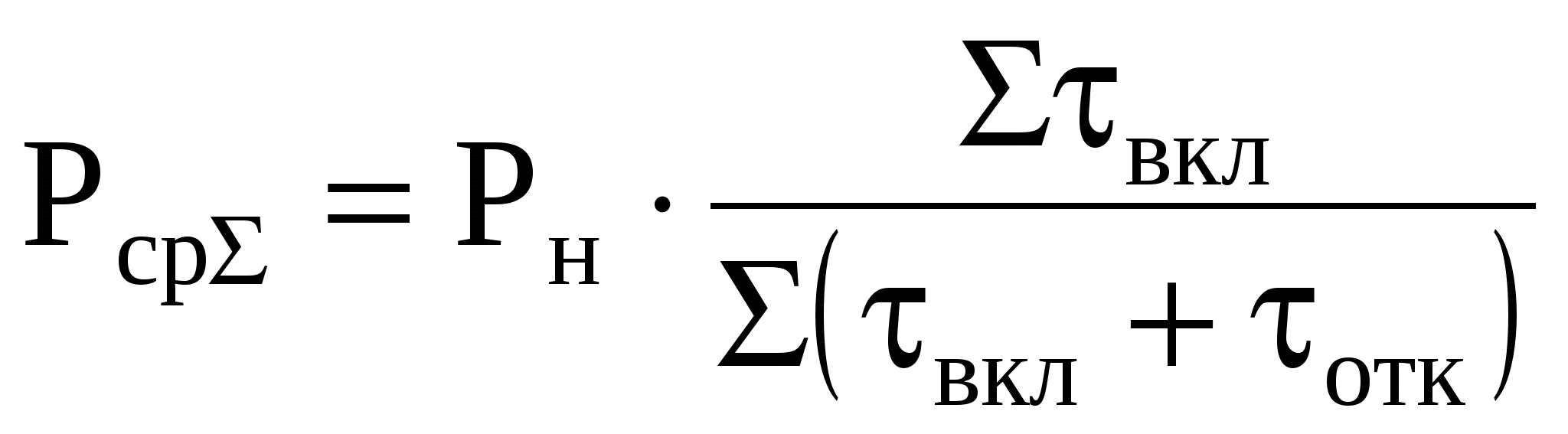
е) по окончании проведения эксперимента снять питание с лабораторной установки, отключив автоматический выключатель QF;   
ж) построить графическую зависимость изменения мощности печи от времени Р = f(τ), на графике показать также изменение средней мощности печи;

з) построить графическую зависимость изменения температуры печи от времени t = f(τ).   
**Таблица 1**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Температура,  **оС** | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| Время нагрева,  сек |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**Таблица 2**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № цикла | Время нахождения печи во включенном состоянии, τвкл | Время нахождения печи в выключенном состоянии, τвыкл | Максимальная температура цикла,  Tmax | Минимальная  температура  цикла,  Tmin |
| 1 |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |
| 9 |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |

**3. Указания по обработке результатов эксперимента**  
  
При обработке результатов эксперимента необходимо руководствоваться следующей методикой :  
  
а) время цикла печи определяется по формуле  
τц= τвкл + τвыкл,  
где τвкл, τвыкл – время нахождения печи во включенном и выключенном состоянии соответственно, мин.;  
  
б) средняя мощность печи Рср, Вт за время τц определяется по формуле  
,  
где Рн – номинальная мощность печи, Вт;  
в) суммарная средняя мощность печи РсрΣ, Вт печи за время цикла определяется как  
;  
  
Графические зависимости изменения мощности печи от времени Р = f(τ) и изменения температуры печи от времени t = f(τ) построить аналогично рис.5.  
    
  
  
**4. Содержание отчета**  
  
Отчет по работе должен содержать :  
- цель работы;

- краткую характеристику контактных датчиков температуры;

- описание принципа двухпозиционного регулирования температуры в электрической печи сопротивления;  
- электрическую схему печи и описание ее работы;  
- таблицы с результатами эксперимента;   
- расчетные значения величин, необходимые для построения графических зависимостей;  
- графические зависимости Р = f(τ) и t = f(τ).

**5. Контрольные вопросы**

1. Объяснить принцип двухпозиционного регулирования температуры в электрической печи сопротивления.  
2. Чем вызваны колебания температуры нагревателей при двухпозиционном регулировании? Что необходимо предпринять, для того, чтобы уменьшить их амплитуду?   
3. Какими способами можно достичь уменьшения мощности, потребляемой печью?  
4. Пояснить графическую зависимость изменения мощности печи от времени.