

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА ОТ ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ СТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Цель работы:

Целью работы является изучить свойства водяного пара; освоить одну из методик экспериментального исследования процесса парообразования.

Задачи работы:

1. Изучить теоретический материал по термодинамике водяного пара и настоящие указания; начертить схему установки и подготовить форму протокола для записи измерений.
2. Провести эксперимент по определению зависимости давления водяного пара от температуры его насыщения.
3. Составить отчет, в котором привести:
 - а) схему установки с марками и ценой деления шкалы приборов;
 - б) протокол измерений с подписью преподавателя;
 - в) обработанные результаты опыта (построить кривую насыщения, с помощью уравнения Клапейрона – Клаузиуса рассчитать теплоту парообразования и выразить графически её зависимость от температуры; произвести сравнение полученных результатов с табличными и оценить точность опыта).

Краткие теоретические сведения

Изучение свойств реальных газов показывает, что при определенной для каждого вещества температуре насыщения t_n происходит фазовый переход жидкости в пар (процесс парообразования). Давление образующегося в присутствии воды насыщенного пара будет обуславливаться только температурой насыщения. Зависимость между давлением насыщенного пара P_n и температурой насыщения t_n называется кривой насыщения. Каждому веществу присуща своя, особая кривая насыщения $P_n = P_n(t_n)$, (рис. 1).

Любая точка этой кривой соответствует двухфазному состоянию вещества: равновесному существованию кипящей жидкости и сухого насыщенного пара, левее кривой фазового равновесия расположена область ненасыщенной (переохлажденной) жидкости, а правее зона перегретого пара. Кривая насыщения оканчивается в критической точке. Выше нее нет четкой границы, где бы вещество распалось на две одновременно и равновесно существующие фазы.

Аналитически кривая насыщения любого вещества описывается уравнением Клапейрона – Клаузиуса:

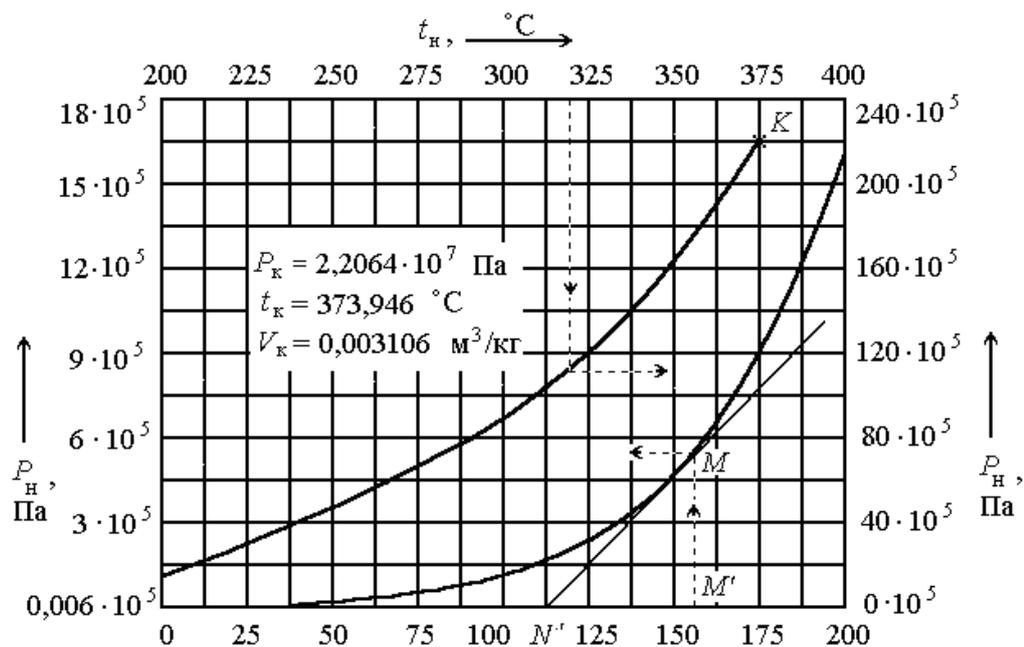


Рис. 1. Кривая насыщения воды

$$\frac{dP_n}{dT_n} = \frac{r}{T_n(v'' - v')}$$

где P_n – давление насыщенного пара, кПа; T_n – температура насыщения, К; r – теплота парообразования, кДж/кг; v'' , v' – удельные объемы соответственно сухого насыщенного пара и кипящей жидкости, м³/кг.

Различные термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (удельный объём, теплота парообразования, энтальпия и энтропия) являются, подобно давлению, функциями только температуры насыщения. Для различных веществ такие опытные данные приводятся во многих справочниках, например в [2–4].

Прямой статический метод исследования кривой насыщения состоит в том, что манометром измеряется давление насыщенного пара, находящегося в равновесии с жидкостью, нагретой в термостатирующем сосуде высокого давления до определённой температуры.

Описание опытной установки

Основным элементом установки (рис. 1), оказывающим влияние на тепловую инерционность, является толстостенный цилиндрический сосуд 1, выполненный из стали XI8H9T, в нижнюю часть которого введена гильза для горячего спая 2 термопары, а в верхнюю – трубка для подключения манометра. Гильза для термопары и трубка выполнены из материала XI8H9T.

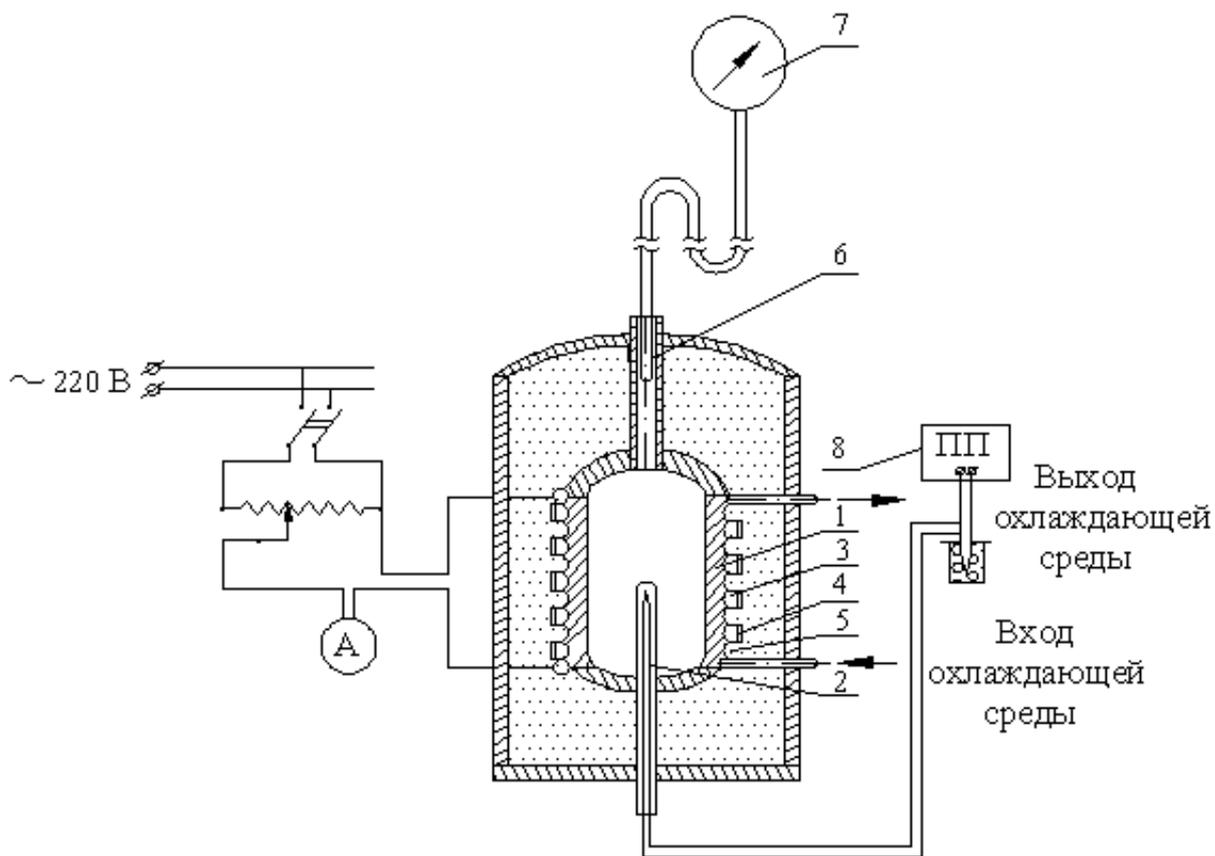


Рис. 2. Схема опытной установки

С целью уменьшения тепловой инерционности цилиндрического сосуда как в период нагрева, так и в период охлаждения его до исходного состояния нагреватель и холодильник максимально приближены к его наружной поверхности. Существенное развитие наружной поверхности достигнуто за счет создания двухзаходных винтовых углублений, профилированных так, что они образуют ребра оптимального профиля. На базе одного из винтовых углублений создан винтовой канал 3 герметичной приваркой к торцам ребер полосы 4. Образованный таким образом винтовой канал используется для подачи в него охлаждающей жидкости в период охлаждения установки.

В другое винтовое углубление 5 уложена спираль электронагревателя, изолированная фарфоровыми бусинками. Для уменьшения потери тепла сосуд помещен в кожух с теплоизолирующим материалом. Вода залита в сосуд в таком количестве, чтобы удельный объем двухфазной системы «вода – пар» равнялся точно критическому $V_{кр}$, т. е.:

$$V_{кр} = V / G,$$

где V – объём сосуда,
а G – масса воды, кг.

Для обеспечения строгого дозирования количества жидкости в период заполнения установки в толстостенную трубку, соединяющую цилиндрический сосуд с манометром, помещена капиллярная трубка 6 так, что один конец ее выходит за пределы U -образных изгибов, а другой – к концу гайки, крепящей манометр. Капиллярная трубка помещается внутрь толстостенной перед изготовлением U -образных изгибов.

Давление насыщенного пара измеряется образцовым манометром 7, а соответствующая температура насыщения – хромель-копелевой термопарой 2, спай которой помещается в гильзе, вваренной внутрь сосуда 1.

ТермоЭДС термопары в мВ измеряется потенциометром 8, правила пользования которым изложены в приложении. Градуировочную таблицу для перевода мВ в t °С см. в табл. П.3.1, П.3.2.

С целью автоматизации процесса измерения температуры и давления пара в схему установки были включены АЦП 8 и ПЭВМ 9 (рис. 3).

Порядок проведения опыта

Изучив установку на месте и заготовив форму протокола для записи измерений, можно приступить к опыту.

Запись результатов измерений рекомендуется заносить в протокол измерений, форма которого приведена на стенде.

Кривую насыщения рекомендуется строить по шести точкам равновесного состояния.

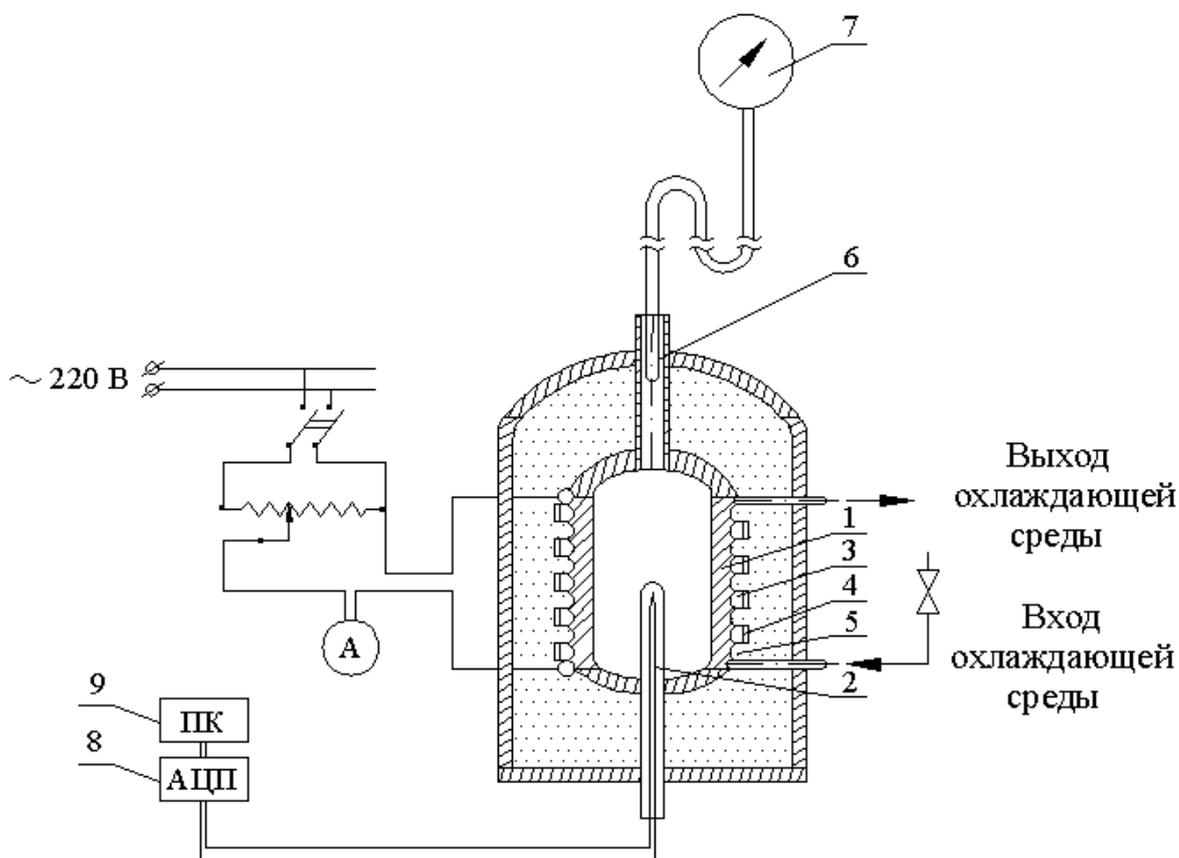


Рис. 3. Схема опытной установки с автоматической регистрацией температуры и давления пара

Пуск установки производить в следующем порядке:

- а) пакетный выключатель установить в положение «ВКЛ»;
- б) нажать кнопку «ПУСК».

Наличие тока в цепи контролируется амперметром.

С момента включения установки, необходимо периодически контролировать ЭДС термопары с помощью потенциометра. Первую точку равновесного состояния рекомендуется зафиксировать при температуре 210–230 °С (соответствует ЭДС термопары ХК15,5–17,1 мВ), для чего следует:

- а) при достижении ЭДС термопары 15,5–17,1 мВ выключить нагреватель, нажав кнопку «СТОП», и занести в протокол значение ЭДС термопары и показания манометра четыре раза (с интервалом в одну минуту);

б) для перехода к следующему равновесному состоянию снова включить нагреватель и периодически контролировать показания с помощью потенциометра ЭДС термопары.

Вторую и последующие точки равновесного состояния определяют в следующем диапазоне термоЭДС:

18,5–20,5 мВ – для второй точки;

22,0–23,5 мВ – для третьей точки;

24,2–25,0 мВ – для четвертой точки;

26,0–26,8 мВ – для пятой точки;

28,5–29,4 мВ – для шестой точки.

Порядок выполнения замеров и их число остаются такими же, как и для первой точки.

По завершении опыта выключить нагреватель.

Обработка результатов измерений

1. По экспериментальным значениям температуры насыщения и давления насыщенного пара построить в координатах $P_n - t_n$ кривую насыщения воды. На этом же графике пунктиром изобразить табличную ($P_n - t_n$) зависимость давления насыщенного пара от температуры.

Кроме того, в приближенной форме зависимость $P_n = f(t_n)$ может быть представлена соотношением $P_n = (t_n / 100)^4$, где t_n в градусах Цельсия, а P_n в барах.

Для полученных в опыте значений $P_{n \text{ опыт}}$ найти расхождения с табличными данными (см. табл. П.3.5):

$$\delta P_n = \frac{P_{n \text{ опыт}} - P_{n \text{ таб}}}{P_{n \text{ таб}}} \cdot 100 \%$$

Расхождения по второму состоянию необходимо сопоставить далее с погрешностью этого опыта:

$$\delta P_n^{\text{полн}} = \delta P_n + \delta P_n^{\text{отн}} = \frac{\Delta P}{P_n} + \frac{1}{P_n} \cdot \frac{dP_n}{dT_n} \cdot \Delta t,$$

где ΔP и Δt – абсолютные погрешности измерения давления и температуры; dP_n / dT_n – производная от опытной функциональной зависимости $P_n = P_n(t_n)$ (определение ее излагается ниже).

С помощью уравнения Клапейрона – Клаузиуса вычислить значение теплоты парообразования для всех исследованных в опыте равновесных состояний. Необходимые для этого расчета величины V' и V'' надлежит взять из справочных таблиц (см. табл. П.3.5). Значение производной dP_n / dT_n можно определить из графика кривой насыщения ($P_n = f(t_n)$), построенного по результатам опыта.

С этой целью наиболее целесообразно величину dP_n / dT_n представить как отношение приращения давления ΔP_n в рассматриваемой точке приращению температуры ΔT_n в той же точке:

$$\frac{dP_n}{dT_n} = \frac{\Delta P_n}{\Delta T_n} = \frac{P_n - P_{n-1}}{T_n - T_{n-1}}.$$

По вычисленным теплотам парообразования построить кривую $r_{\text{расч}} = f(t_n)$ и здесь же пунктиром нанести табличную зависимость $r_{\text{табл}} = f(t_n)$ (см. табл. П.3.5, рис. П.3.1).

Для изученных состояний найти расхождения:

$$\delta r = \frac{r_{\text{расч}} - r_{\text{табл}}}{r_{\text{табл}}} \cdot 100 \% .$$

Контрольные вопросы

1. Объяснить PV -, Ts -, is -диаграммы водяного пара.
2. Дать понятия о фазовых переходах и определение кривой насыщения.
3. Что такое критическое состояние вещества?
4. Записать формулы для определения параметров воды и сухого насыщенного пара.
5. Записать формулы для определения параметров влажного насыщенного и перегретого пара.
6. Что такое теплота парообразования? Как определить количество тепла, затрачиваемое на подогрев жидкости до кипения и перегрев пара?
7. Записать уравнение Клапейрона – Клаузиуса.
8. Какова сущность статического метода исследования кривой насыщения?