

насыщения от давления насыщения, представленные в графическом виде. Затем определяют максимальное относительное отклонение по температуре насыщения опытных данных от стандартных:

$$\varepsilon = \frac{|t_{\text{н}} - t_{\text{н}}^{\text{Т}}|}{t_{\text{н}}^{\text{Т}}} \cdot 100\%. \quad (3.23)$$

После этого формулируют вывод о точности опытных данных.

На основании опытного значения сухости пара объясняют, в каком состоянии он находится.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что является термодинамической системой в данной работе?
2. Что такое температура и давление насыщения?
3. Какими параметрами характеризуется состояние термодинамической системы, состоящей из сухого насыщенного пара?
4. Какими параметрами характеризуется состояние термодинамической системы, состоящей из влажного насыщенного пара?
5. В чем заключается физический смысл степени сухости пара, как она определяется?
6. Из каких основных элементов состоит лабораторная установка?
7. Какие приборы используются в работе для измерения параметров водяного пара?
8. Какова последовательность проведения эксперимента?
9. Изобразить процесс парообразования воды в  $p\nu$ -,  $Ts$ -координатах.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ТЕПЛОТА КОНДЕНСАЦИИ (ПАРООБРАЗОВАНИЯ) ВОДЫ

**Принадлежности:** 1) парогенератор с теплоэлектронагревателем (ТЭНом); 2) лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 3) стеклянный проточный калориметр (теплообменник); 4) стеклянный лабораторный термометр; 5) ротаметр; 6) мерный сосуд (мензурка); 7) термопреобразователи; 8) измеритель температуры.

**Цель работы:** определение теплоты конденсации (парообразования) опытным путем.

**Введение.** Вещество может претерпевать изменение состояния. В термодинамике различные состояния вещества – твердое, жидкое, газообразное – принято называть фазами.

Одним из наиболее распространенных веществ, которое находит широкое применение в быту и промышленности, является вода. Процесс перехода воды из жидкого состояния в газообразное во всем объеме жидкости называется кипением. Кипение сопровождается подводом теплоты к системе. При этом подводимая к воде теплота не приводит к повышению температуры, а лишь переводит воду из жидкости в пар при температуре кипения  $t_{\text{кип}}$ . При заданном давлении воде присуща определенная температура кипения.

Теплота, которая присутствует в паре и поглощается им, не вызывая повышения температуры, называется теплотой кипения  $r_{\text{кип}}$ .

Обратный процесс преобразования пара в жидкость называется конденсацией. Когда пар сжимается, скрытая теплота, которая называется теплотой конденсации  $r_{\text{конд}}$ , выделяется в окружающую среду. Конденсация, так же как и процесс кипения, происходит при постоянной температуре конденсации  $t_{\text{конд}}$ . При заданном давлении для воды  $t_{\text{конд}} = t_{\text{кип}}$  и  $r_{\text{конд}} = r_{\text{кип}}$ .

В данной работе будет определяться теплота конденсации при атмосферном давлении, что равносильно нахождению теплоты кипения.

Для определения теплоты конденсации используется частный случай закона сохранения энергии – уравнение теплового баланса:

$$Q = Q_{\text{сис}} = Q_{\text{ос}}, \quad (3.24)$$

где  $Q$  – количество теплоты, участвующей в процессе;  $Q_{\text{сис}}$  – теплота, отведенная от термодинамической системы;  $Q_{\text{ос}}$  – теплота, переданная в окружающую среду.

Мы исследуем открытую термодинамическую систему в виде потока конденсирующегося пара в трубке тока, на вход которой поступает насыщенный сухой водяной пар с расходом  $G_{\text{к}}$  (рис. 3.3). Пар конденсируется, конденсат частично охлаждается и на выходе имеет температуру  $t_{\text{вг}}$  ниже температуры конденсации  $t_{\text{вг}} < t_{\text{конд}}$ . Теплота, отводимая в процессе конденсации, передается окружающей среде в виде потока холодной воды с расходом  $G_{\text{вх}}$ , которая нагревается от начальной температуры  $t_{\text{х1}}$  до конечной температуры  $t_{\text{х2}}$ .

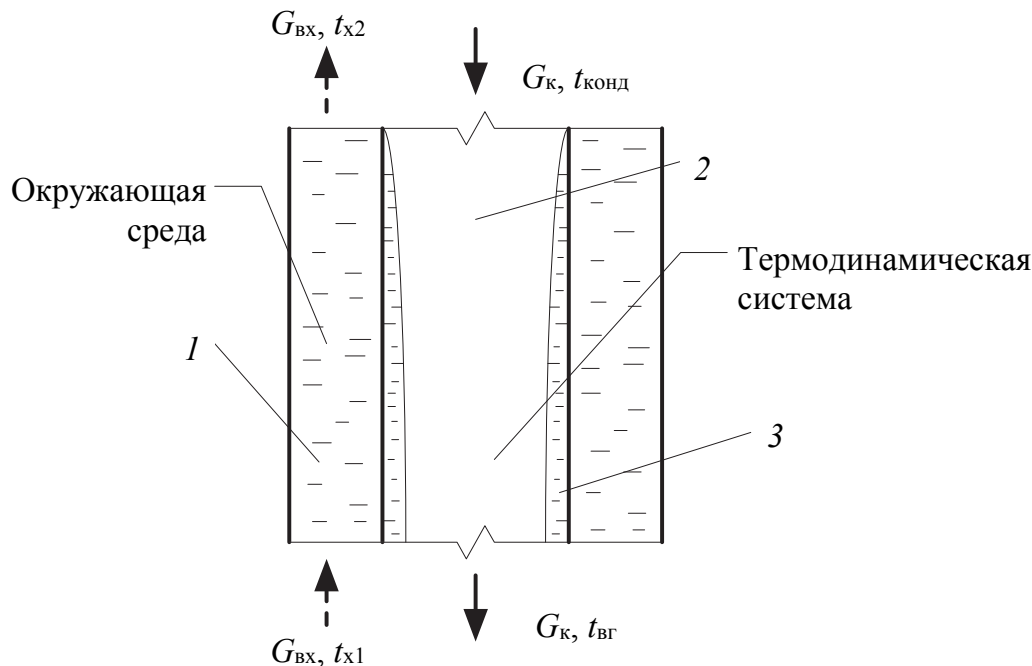


Рис. 3.3. Схема процесса конденсации пара и охлаждения конденсата:  
1 – вода; 2 – пар; 3 – конденсат

С учетом принятых обозначений уравнение теплового баланса (3.24) будет иметь следующий вид:

$$G_K r_{\text{конд}} + G_K c_{pK} (t_{\text{конд}} - t_{\text{вг}}) = G_{\text{вх}} c_{p\text{вх}} (t_{\text{х2}} - t_{\text{х1}}), \quad (3.25)$$

где  $c_{pK}$  и  $c_{p\text{вх}}$  – удельные массовые теплоемкости конденсата и холодной воды при постоянном давлении.

В левой части уравнения, относящейся к термодинамической системе, два слагаемых. Первое учитывает отводимую теплоту конденсации, а второе – теплоту, отводимую от конденсата при его охлаждении. Общая теплота передается окружающей среде – холодной воде.

Преобразовав уравнение (3.25), найдем теплоту конденсации:

$$r_{\text{конд}} = \frac{G_{\text{вх}}}{G_K} c_{p\text{вх}} (t_{\text{х2}} - t_{\text{х1}}) c_{pK} (t_{\text{конд}} - t_{\text{вг}}). \quad (3.26)$$

**Описание установки.** Схема лабораторной установки дана на рис. 3.4. В парогенераторе 1 с ТЭНом 2 находится вода. Емкость снабжена уровнемером 4, на котором красной линией отмечен минимально допустимый уровень воды. ТЭН включен в электрическую цепь, содержащую лабораторный автотрансформатор 3, вольтметр и амперметр. При подводе к ТЭНу электрическая энергия преобразуется в теплоту, которая передается воде.

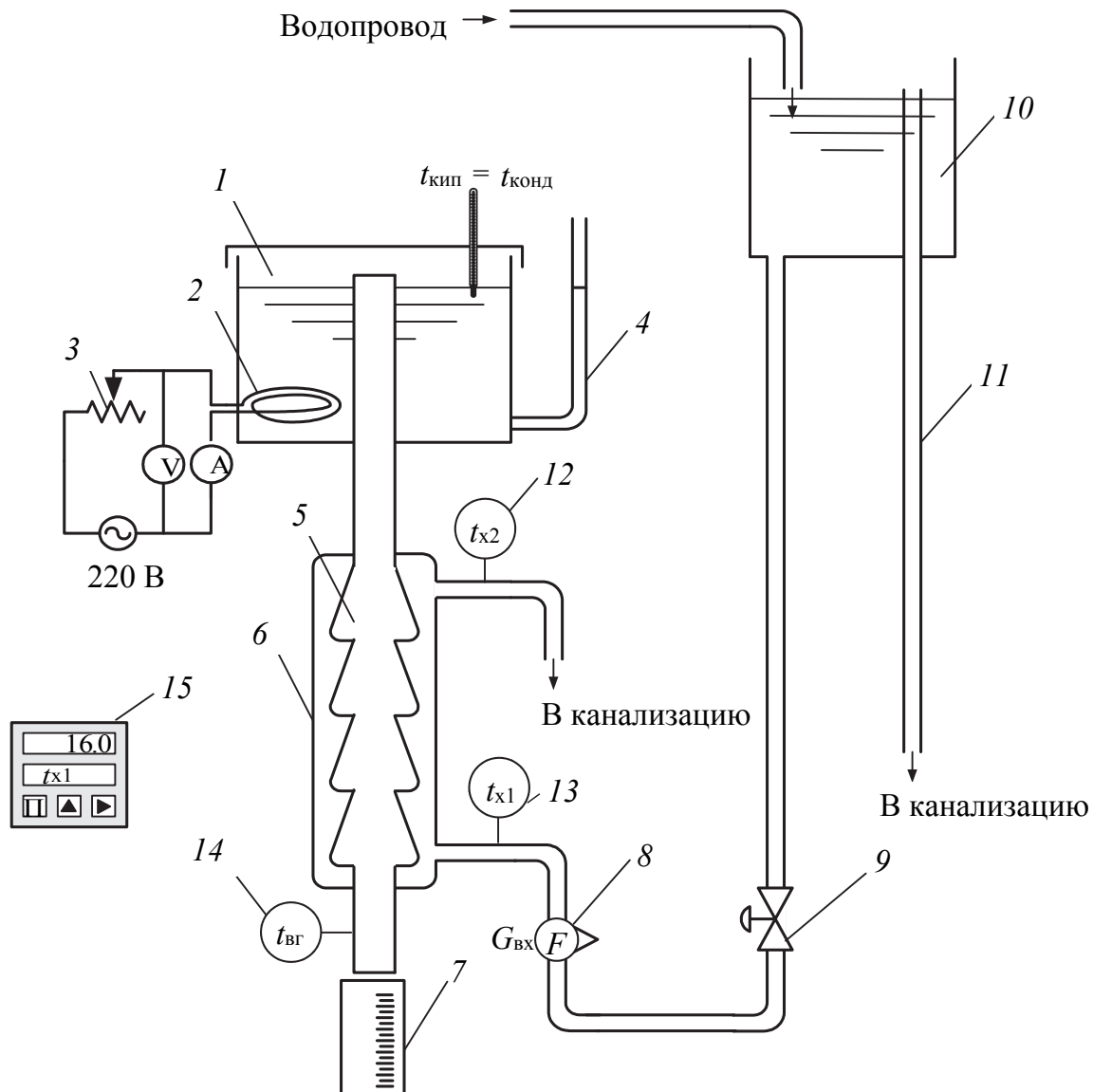


Рис. 3.4. Схема лабораторной установки:

- 1 – парогенератор; 2 – ТЭН; 3 – ЛАТР;  
 4 – уровнемер; 5 – внутренняя труба калориметра;  
 6 – корпус калориметра;  
 7 – мерный стакан; 8 – ротаметр;  
 9 – регулировочный кран; 10 – напорный бак;  
 11 – дренажная линия; 12, 13, 14 – термопреобразователи;  
 15 – измеритель температуры

Первоначально вода нагревается до температуры кипения, затем в процессе кипения переходит из жидкого состояния в пар. Пар из емкости направляется во внутреннюю трубу 5 проточного калориметра, который представляет собой рекуперативный теплообменный аппарат. С внешней стороны, в межтрубном пространстве, образованном поверхностями внутренней трубы 5 и корпуса калориметра 6,

внутренняя труба омывается холодной водой из напорного бака 10. Теплота, отводимая от пара и конденсата, передается холодной проточной водопроводной воде, и она нагревается. Установка для измерения параметров потоков снабжена лабораторным термометром для замера температуры  $t_{\text{конд}}$ , прибором для измерения температур  $t_{x1}$ ,  $t_{x2}$ ,  $t_{\text{вг}}$  и ротаметром 8 для замера расхода воды  $G_{\text{вх}}$ . Регулировка расхода воды в калориметре 6 осуществляется с помощью крана 9 на гибком шланге.

**Подготовка установки к эксперименту.** Вначале проверяют уровень воды в емкости. Если он ниже красной отметки на уровнемере, то в емкость доливают воду. После этого включают ТЭН. С помощью автотрансформатора устанавливают напряжение  $\sim 200$  В. Под выходным патрубком калориметра устанавливают емкость для сбора конденсата. Далее ведут наблюдение за температурой воды  $t_{\text{конд}}$  по термометру. При достижении  $95\text{--}100^\circ\text{C}$  открывают кран 9 с холодной водой.

**Проведение эксперимента.** Для проведения эксперимента преподавателем задаются рабочее напряжение на ТЭНе и расход воды через ротаметр. Путем регулировки устанавливают требуемое по заданию напряжение  $U$  и расход  $G_{\text{вх}}$ , которые в процессе эксперимента поддерживают постоянными. При достижении стационарного режима, когда капли конденсата начинают вытекать равномерно, вместо емкости для сбора конденсата ставят мерный стакан (мензурку). Одновременно начинают отсчет времени по часам. Заносят в табл. 3.4 измеряемые параметры  $t_{\text{конд}}$ ,  $t_{\text{вг}}$ ,  $t_{x1}$ ,  $t_{x2}$ ,  $G_{\text{вх}}$ . По истечении 10 мин измеряют количество воды в мерном стакане и полученное значение записывают в табл. 3.4.

После записи всех данных опыт повторяют. Если значения измеренных параметров 1-го и 2-го опытов отличаются на небольшую величину, то эксперимент считают выполненным. В противном случае проводят дополнительный опыт. Затем установку выключают и закрывают все краны.

**Обработка результатов измерений.** С помощью градуировочного графика переводят значение числа делений  $n$  шкалы ротаметра в массовый расход  $G_{\text{вх}}$ . Вычисляют массовый расход конденсата  $G_{\text{к}}$ , кг/с, за время его сбора  $\tau$ , с, в мерный стакан:

$$G_{\text{к}} = \frac{m}{\tau} \cdot 10^{-3}, \quad (3.27)$$

где  $m$  – масса конденсата (масса 1 мл соответствует 1 г), г.

Таблица 3.4

## Результат обработки опытных данных

Номер опыта	Термодинамическая система					Окружающая среда				$r_{\text{конд}}$ , кДж/кг
	$t_{\text{конд}}$ , °C	$t_{\text{вг}}$ , °C	$G_{\text{к}}$			$t_{\text{х1}}$ , °C	$t_{\text{х2}}$ , °C	$G_{\text{вх}}$		
			$\tau$ , с	$m$ , г	кг/с			$n$	кг/с	
1										
2										
3										
Средние значения										
$p_{\text{конд}} = \dots$ МПа, $U = \dots$ В, $c_{\text{рк}} = \dots$ кДж/(кг·°C), $c_{\text{рвх}} = \dots$ кДж/(кг·°C).										

Вычисляют среднее значение температур и расходов и заносят в таблицу рабочей тетради. Используя формулу (3.3), рассчитывают теплоту конденсации по средним значениям параметров.

**Анализ результатов.** В табл. П4 находят стандартное значение теплоты конденсации  $r_{\text{конд}}^T$  при  $t_{\text{конд}}$ . Определяют отклонение опытного значения теплоты конденсации от стандартного:

$$\varepsilon = \frac{|r_{\text{конд}} - r_{\text{конд}}^T|}{r_{\text{конд}}^T} \cdot 100\%. \quad (3.28)$$

Работу заканчивают анализом полученных результатов и выводами о достоверности опытного значения теплоты конденсации.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что является термодинамической системой и окружающей средой в данной работе?
2. В каких состояниях может находиться вещество?
3. Что такое кипение и конденсация? Какими тепловыми процессами они сопровождаются?
4. Что выражает уравнение теплового баланса?
5. Что такое теплота конденсации (парообразования)?
6. Из каких основных элементов состоит лабораторная установка?
7. Какие приборы для измерения температуры и расхода используются в установке?
8. Какова последовательность проведения эксперимента?
9. Представить процесс парообразования в  $p\nu$ - и  $Ts$ -координатах.