

**Министерство образования Республики Беларусь**

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

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»**

# **ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ**

## **ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ для студентов  
специальностей 1-43 01 05 «Промышленная  
теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая  
эксплуатация энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2020**

УДК 621.565.93/.95:621.57(075.8)  
ББК 31.39+31.368я73  
П81

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 9 от 28.05.2019 г.)*

Составители: *А. В. Овсянник, А. В. Шаповалов, Е. Н. Макеева*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук,  
доц. *А. О. Добродей*

П81 **Промышленные** тепломассообменные процессы и установки : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / сост.: А. В. Овсянник, А. В. Шаповалов, Е. Н. Макеева. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 51 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-443-8.

Даны методика проведения лабораторных работ, теоретические материалы, схемы установок, порядок выполнения работы, обработка результатов и контрольные вопросы для закрепления знаний по изучению различных теплообменных аппаратов, сушильных, ректификационных, выпарных и холодильных установок, тепловых насосов.

Для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.565.93/.95:621.57(075.8)  
ББК 31.39+31.368я73

ISBN 978-985-535-443-8

© Овсянник А. В., Шаповалов А. В.,  
Макеева Е. Н., составление, 2020  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2020

# Лабораторная работа № 1

## ИСПЫТАНИЕ РЕКУПЕРАТИВНЫХ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛОБМЕННЫХ АППАРАТОВ

**Цель работы:** изучение режимов работы и определение коэффициентов теплопередачи рекуперативных водяных подогревателей и охладителей воздуха для систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

### Теоретическая часть

Рекуперативными называются теплообменники, в которых теплообмен между теплоносителями происходит через разделяющую их стенку. По конструкции и форме поверхности рекуперативные теплообменники разнообразны и они получили очень широкое применение в промышленных технологических установках.

К рекуперативным теплообменным аппаратам относятся:

- кожухотрубчатые теплообменники;
- секционные теплообменники;
- ламельные теплообменники;
- спиральные теплообменники;
- пластинчатые теплообменники;
- теплообменники с пленочным движением жидкости и т. д.

*Кожухотрубчатые теплообменники* предназначены для работы с теплоносителями «жидкость–жидкость», «пар–жидкость», «газ–жидкость», «газ–газ» и представляют собой аппараты, выполненные из рядов труб, собранных при помощи трубных решеток в пучок и заключенных в кожух обычно цилиндрической формы. Концы труб для обеспечения плотности их соединения с трубными решетками (досками) развальцовывают, реже припаивают или приваривают к трубным решеткам.

*Секционные теплообменники*, как и кожухотрубчатые, применяют в самых различных областях. Они характеризуются меньшим различием скоростей в межтрубном пространстве и в трубах, чем в кожухотрубчатых аппаратах, при равных расходах теплоносителей. Из них удобно подбирать необходимую площадь поверхности нагрева и изменять ее в случае необходимости.

*Ламельные теплообменники* аналогично кожухотрубчатым имеют кожух, в который заключен пучок труб, но не круглых, а плоских,

образованных попарно сваренными пластинами толщиной 1,5–2 мм. Ламельные теплообменники предназначены для работы с теплоносителями «жидкость–жидкость», «газ–газ», «пар–жидкость». Эффективно их применение в области температур, больших 150 °С, и давлений 1–4,5 МПа, т. е. в области применения пластинчатых теплообменников. Ламельные теплообменники можно компоновать в блоки.

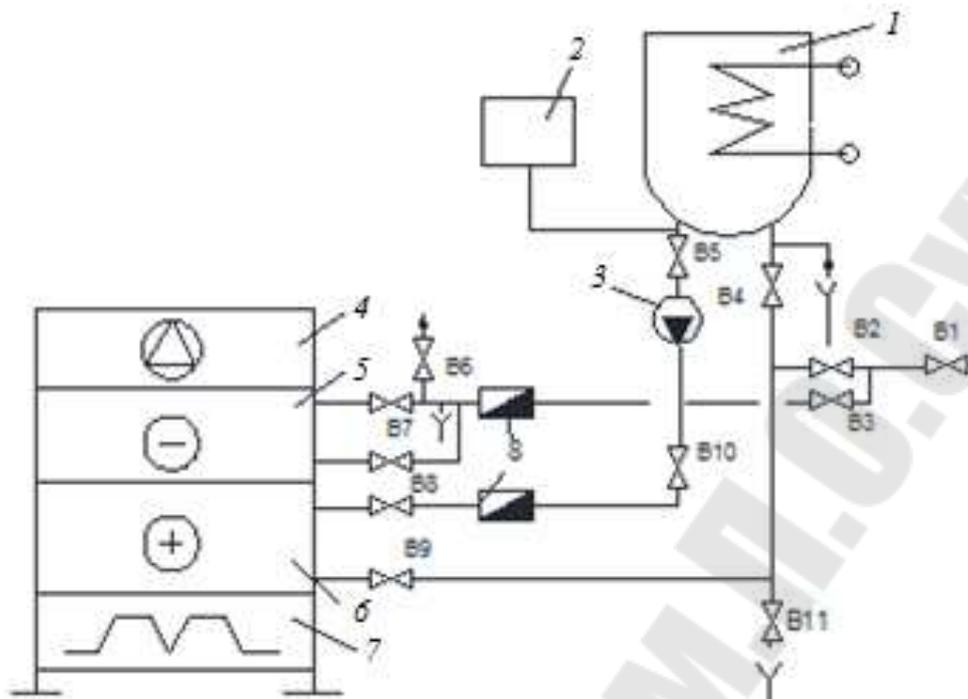
*Спиральные теплообменники* – аппараты, в которых каналы для теплоносителей образованы двумя свернутыми в спирали на специальном станке листами. Расстояние между ними фиксируется приваренными бобышками или штифтами. Навивку спиральных теплообменников производят из рулонной стали шириной от 0,2 до 1,5 м с поверхностями нагрева от 3,2 до 100 м<sup>2</sup> при расстоянии между листами от 8 до 12 мм и толщине стенок 2 мм для давления до 0,3 МПа и 3 мм – до 0,6 МПа.

*Пластинчатые теплообменники* имеют щелевидные каналы, образованные параллельными пластинами. В простейшем случае пластины могут быть плоскими. Для интенсификации теплообмена и повышения компактности пластинам при изготовлении придают различные профили, а между плоскими пластинами помещают профилированные вставки. Пластины штампуют из листовой стали (углеродистой, оцинкованной, легированной), алюминия, мельхиора, титана и других металлов и сплавов.

*Теплообменники с пленочным движением жидкости* часто применяют в пищевой промышленности для тепловой обработки термолабильных, т. е. склонных к разложению при повышенных температурах, материалов. Положительный эффект объясняется тем, что в пленке температурные напоры меньше, чем при заполнении всего сечения канала, а скорость движения выше. В итоге удастся избежать перегрева и разложения обрабатываемой среды в пристенных областях.

### **Порядок выполнения работы**

В настоящей лабораторной работе изучаются режимы работы трубчатого подогревателя воздуха. Воздух вентилятором подается на подогреватель воздуха, входящий в состав установки для вентиляции и кондиционирования воздуха (рис. 1.1), а вода, подогретая в бойлере насосом, прокачивается через трубки подогревателя. В целях интенсификации процесса теплообмена со стороны воздуха осуществлено оребрение теплообменника.



*Рис. 1.1. Схема опытной установки:*

- 1 – электрический вольтметр; 2 – расширительный бак;
- 3 – циркуляционный насос; 4 – блок вентиляторов;
- 5 – охладитель воздуха; 6 – нагреватель воздуха;
- 7 – механический фильтр; 8 – счетчик воды;
- V1–V11 – вентили

### ***Подготовка установки к работе***

1. Проверить визуально целостность установки, отсутствие течи, наличие заземления бойлера и блока вентиляторов.
2. Заполнить установку водой:
  - а) заполнение контура охладителя:
    - поочередно открыть вентили: V6, V7, V8, V3, V1;
    - после заполнения установки водой закрыть краны в той же последовательности;
  - б) заполнение контура нагрева:
    - поочередно открыть вентили: V5, V10, V8, V9, V2, V1;
    - после заполнения контура закрыть вентили в той же последовательности.

### ***Порядок проведения опытов***

Испытание охладителя:

1. Открыть вентили V1, V3, V8, V7.
2. Включить прибор ТРМ 138.

3. Включить блок вентиляторов.
4. Подождать 10 мин до выхода установки на установившийся режим.
5. Анемометром замерить скорость воздуха в сечении фильтра.
6. Замерить расход воды счетчиком.
7. Замерить температуру воды на входе в охладитель, температуру воздуха на входе и выходе из охладителя.
8. Выключить вентиляторы.
9. Закрыть поочередно вентили В7, В8, В3, В1.
10. Выключить прибор ТРМ 138.

Испытание нагревателя:

1. Включить бойлер и установить температуру нагрева воды.
2. Подождать выхода бойлера на заданную температуру.
3. Включить насос.
4. Открыть поочередно вентили В10, В8, В9, В4, В5.
5. Включить ТРМ 138.
6. Включить блок вентиляторов.
7. Подождать выхода установки на установившийся режим.
8. Анемометром замерить скорость воздуха в установке.
9. Замерить расход воды счетчиком.
10. Замерить температуры воды и воздуха на входе и выходе из установки.
11. Выключить вентиляторы.
12. Закрыть поочередно вентили В5, В4, В9, В8, В10 и выключить насос.
13. Выключить ТРМ 138.

### Обработка результатов опыта

1. Тепловая мощность теплообменника, кВт:

$$Q = G_B c_B (t'_B - t''_B), \quad (1.1)$$

где  $c_B$  – теплоемкость воды, кДж/(кг · К);  $G_B$  – расход воды, кг/с;  $t'_B$ ,  $t''_B$  – температура воды на входе и выходе из теплообменника, °С.

2. Построить температурный график для противотока и определить среднелогарифмическую разность температур.
3. Определить площадь теплообмена и размеры ребра.

4. Определить опытный коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{Q}{FK_{\text{оп}} \varepsilon_{\Delta t} \Delta t_{\text{ср.лог}}}, \quad (1.2)$$

где  $K_{\text{оп}}$  – коэффициент оребрения;  $\varepsilon_{\Delta t}$  – поправка на схему движения.

5. Определить расчетный коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}}, \quad (1.3)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\delta$  – толщина стенки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м · К).

6. Сравнить коэффициенты теплопередачи, определенные расчетным и опытным путем.

### Контрольные вопросы

1. Классификация рекуперативных теплообменников и их конструкции.
2. Области применения рекуперативных теплообменников.
3. Кожухотрубчатые теплообменники.
4. Пластинчатые теплообменники.
5. Спиральные теплообменники.
6. Теплообменники с пленочным движением жидкости.
7. Основные расчетные формулы теплообменников.
8. Уравнение теплового баланса при изменении фазового состояния теплоносителей.
9. Изменение температур теплоносителей в теплообменниках.

## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТИВНЫХ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

**Цель работы:** изучение работы рекуперативных кожухотрубчатых конденсаторов; определение коэффициента теплопередачи конденсаторов расчетным и опытным путем.

#### Теоретическая часть

В зависимости от вида охлаждающей среды конденсаторы можно разделить на следующие группы:

- с воздушным охлаждением;
- с водяным охлаждением;
- с водовоздушным охлаждением;
- с охлаждением кипящей жидкостью.

Конденсация хладагента может происходить на наружной поверхности теплообмена (кожухотрубчатые конденсаторы) и внутри труб и каналов (змеевиковые и пластинчатые конденсаторы).

Наибольшее распространение получили конденсаторы с водяным и водовоздушным охлаждением с конденсацией хладагента на наружной поверхности теплообмена и внутри труб и каналов.

*Кожухотрубчатые конденсаторы и подогреватели* применяют в тепловых схемах ТЭЦ и ТЭС, а также в холодильных установках для конденсации парообразного рабочего тела. В качестве охлаждающей среды в конденсаторах используется, как правило, вода. В подогревателях конденсирующийся пар нагревает питательную воду, идущую на питание парогенератора.

*Горизонтальные кожухотрубчатые конденсаторы* получили широкое распространение в холодильных установках средней и крупной производительности.

В холодильных установках нашли применение *пакетно-панельные конденсаторы и испарители*. Основным элементом таких теплообменников является панель, изготовленная из двух стальных листов, отштампованных по специальному профилю с выступами и впадинами. Пакетно-панельный конденсатор представляет собой пакет, собранный из отдельных секций. Секция состоит из нескольких панелей.

## Порядок выполнения работы

Принципиальная схема теплового насоса дана на рис. 2.1.

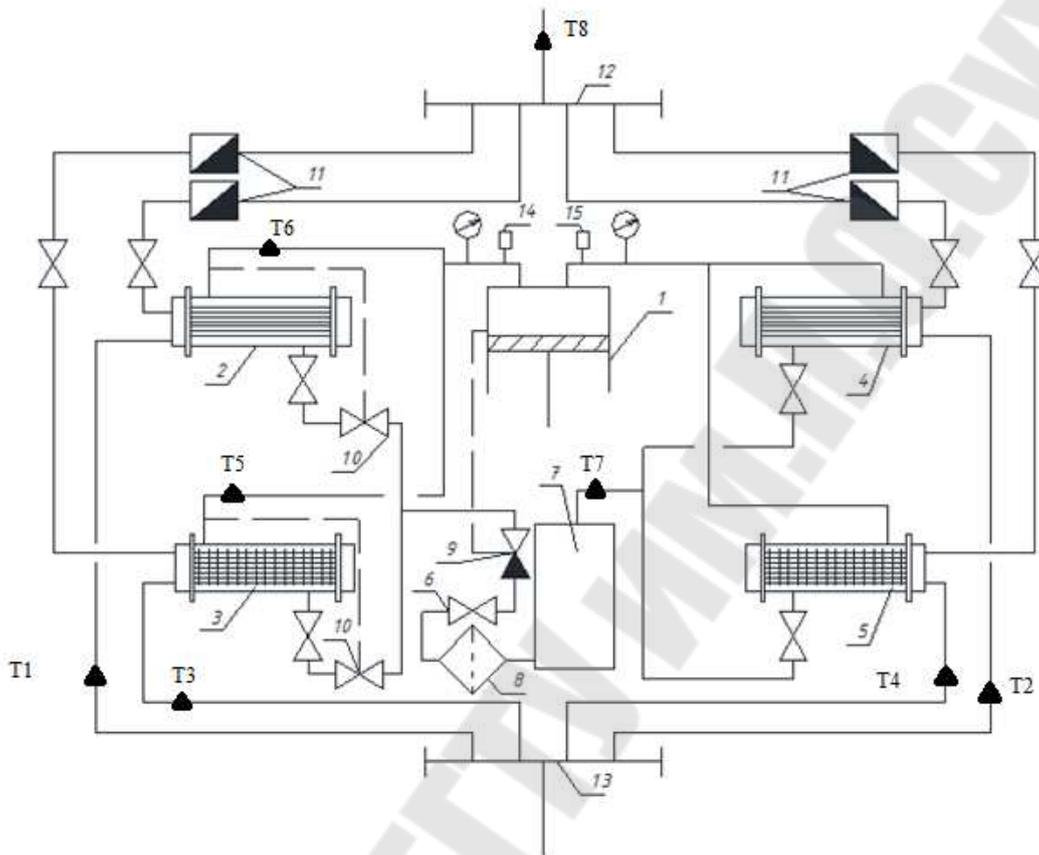


Рис. 2.1. Принципиальная схема теплового насоса:

- 1 – компрессор; 2 – испаритель с гладкими трубками;
- 3 – испаритель с оребренными трубками; 4 – конденсатор с гладкими трубками; 5 – конденсатор с оребренными трубками;
- 6 – дроссель-вентиль; 7 – ресивер; 8 – фильтр; 9 – соленоидный вентиль; 10 – терморегулирующий вентиль; 11 – счетчики воды;
- 12 – распределительная гребенка входящей воды;
- 13 – распределительная гребенка выходящей воды;
- 14 – реле низкого давления; 15 – реле высокого давления;
- T1–T8 – термопары

Характеристика теплообменных аппаратов:

- а) испарители кожухотрубные – кожух диаметром  $133 \times 4$  мм, длиной 690 мм:
  - с пучком оребренных труб: количество труб – 24 шт.; диаметр – 8/6,4 мм; длина – 600 мм; оребрение круглое диаметром 16 мм; толщиной 2 мм и количеством ребер 57 шт. на трубе;

– с пучком гладких труб: количество труб – 24 шт.; диаметр – 8/6,4 мм; длина – 600 мм;

б) конденсаторы кожухотрубные – кожух диаметром 133 × 4 мм, длиной 690 мм:

– с пучком оребренных труб: количество труб – 20 шт.; диаметр – 8/6,4 мм; длина – 600 мм; оребрение круглое диаметром 16 мм; толщиной 2 мм и количеством ребер 57 шт. на трубе;

– с пучком гладких труб: количество труб – 20 шт.; диаметр – 8/6,4 мм, длина 600 мм.

1. Произвести визуальный осмотр установки.

2. Открыть вентиль слива воды в канализацию.

3. Включить подачу воды в установку. Убедиться в отсутствии течи.

4. Соответствующими вентилями открыть подачу хладагента в испарители и конденсаторы, с которыми будет осуществляться работа. Осуществить подачу воды в работающие испарители и конденсаторы. *Не начинать работу на установке с теплообменниками, в которые подается хладагент, но не подается вода, так как это ведет к поломке!*

5. Включить установку в сеть. Включить прибор ТРМ 138.

6. Запустить компрессор.

7. Подождать, пока установка выйдет на режим работы (15–20 мин).

8. Произвести измерения температуры воды на входе/выходе из теплообменников, давления хладагента на входе/выходе из компрессора, мощность компрессора, температуры хладагента на входе в компрессор и на входе в ресивер, расхода воды через теплообменники.

9. Выключить компрессор, прибор ТРМ 138 и отключить установку от сети.

10. *После выключения установки вода должна циркулировать в теплообменниках не менее 15 мин во избежание замораживания трубок испарителя.*

11. Отключить подачу воды, закрыть вентиль на сливе воды в канализацию.

12. При смене теплообменников в опыте необходимо дать установке время для слива хладагента (не менее часа).

## Обработка результатов измерений

Результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Результаты измерений**

Расход воды $G$ , кг/с		Давление, кПа		Мощность компрес- сора $N_k$ , кВт	Температура, °С			
					воды		хладагента	
через испари- тель	через конден- сатор	в испа- рителе $p_0$	в конден- саторе $p_k$		на входе в кон- денса- тор $t'_k$	на выходе из кон- денсато- ра $t''_k$	на выходе из кон- денса- тора	на выходе из испа- рителя

1. Строим цикл парокompрессионной холодильной машины для хладагента R134a в  $p$ - $h$ -координатах и определяем параметры характерных точек:  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ , кДж/кг,  $t_2$ , °С.

2. Удельная работа компрессора, кДж/кг:

$$l_k = h_2 - h_1. \quad (2.1)$$

3. Расход хладагента, кг/с:

$$D = \frac{N_k}{l_k}. \quad (2.2)$$

4. Тепловая нагрузка конденсатора, Вт:

$$Q_k = G c_v (t''_k - t'_k). \quad (2.3)$$

5. Среднелогарифмическая разность температур, °С. Для упрощения расчетов считаем, что в конденсаторе происходит лишь конденсация паров. Тогда:

$$\Delta t_{cp} = \Delta t_{cp,пр} \varepsilon_{\Delta t}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta t_{cp,пр}$  – разность температур при противотоке;  $\varepsilon_{\Delta t}$  – поправочный коэффициент;

$$\Delta t_{cp,пр} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}. \quad (2.5)$$

6. Площадь теплообмена, м<sup>2</sup>:

$$F = \pi d_n l n, \quad (2.6)$$

где  $d_n$  – наружный диаметр трубок, м;  $l$  – длина трубок, м;  $n$  – количество трубок.

7. Коэффициент теплопередачи конденсатора:

$$K = \frac{Q_k}{F \Delta t_{cp}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.7)$$

8. Коэффициент теплопередачи расчетный:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{1}{\alpha_x} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (2.8)$$

где  $\alpha_b$  – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$$\alpha_b = \frac{\text{Nu} \lambda}{d_{вн}}, \quad (2.9)$$

где Nu – число Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воды при  $t = \frac{t'_k + t''_k}{2}$ .

При  $\text{Re}_{ж} > 10^4$   $\text{Pr}_{ж} = 0,6 \div 2500$ ;

$$\text{Nu}_{ж} = 0,021 \cdot \text{Re}_{ж}^{0,8} \text{Pr}_{ж}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{ж}}{\text{Pr}_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_l; \quad (2.10)$$

при  $\frac{L}{d} \geq 50$   $\varepsilon_l = 1$ ;  $\frac{L}{d} < 50$   $\text{Re} = \frac{w_{ж} d_{вн}}{v_{ж}}$ ;  $v_{ж}$ ,  $\text{Pr}_{ж}$  – по таблицам для во-

ды при  $t = \frac{t'_k + t''_k}{2}$ ;  $\text{Pr}_{ст}$  – при  $t = t_{ст}$ .

При  $\text{Re} > 2300$   $\text{Re} < 10^4$ ;

$$\text{Nu}_{ж} = 0,021 \cdot \text{Re}_{ж}^{0,8} \text{Pr}_{ж}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{ж}}{\text{Pr}_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_l \varepsilon_{пер}, \quad (2.11)$$

где  $\varepsilon_{пер}$  – коэффициент, учитывающий перемеживаемость потока.

При  $Re < 2300$ :

а)  $Gr \cdot Pr \leq 5 \cdot 10^5$ ;

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu_{ж} = 1,61(Re_{ж} \cdot Pr_{ж})^{0,33} \left(\frac{d}{L}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{ст}}\right)^{0,14} \quad \text{при } Re_{ж} Pr_{ж} \frac{d}{L} > 12; \\ Nu_{ж} = 3,66 \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{ст}}\right)^{0,14} \quad \text{при } Re_{ж} \cdot Pr_{ж} \frac{d}{L} \leq 12; \end{array} \right. \quad (2.12)$$

б)  $Gr \cdot Pr > 5 \cdot 10^5$ ;

$$Nu = 1,15(Re \cdot Pr)^{0,33} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}; \quad (2.14)$$

$\alpha_x$  – коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стенке трубки:

$$\alpha_x = \varepsilon a^4 \sqrt{\lambda_k^3 \rho_k^2 r g / (\mu_k \Delta t l)}, \quad (2.15)$$

где  $\varepsilon = 0,7$  при  $n \leq 100$  и  $\varepsilon = 0,6$  при  $n > 100$ ;  $a = 0,728$  для трубы;  $l = d_n$ ;  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности;  $\rho_k$  – плотность;  $\mu_k$  – динамический коэффициент вязкости конденсата по  $t_{конд}$ .

9. Погрешность расчета:

$$\Delta = |k - k_p|; \quad (2.16)$$

$$\delta = \frac{|k - k_p|}{k} 100 \%. \quad (2.17)$$

### Контрольные вопросы

1. Конденсаторы. Особенности конструкции.
2. Типы конденсаторов. Область применения.
3. Кожухотрубчатые конденсаторы.
4. Пакетно-панельные конденсаторы и испарители.
5. Определение коэффициента теплопередачи при конденсации.
6. Уравнение теплового баланса при изменении фазового состояния теплоносителей.
7. Изменение температур теплоносителей в конденсаторе.

### Лабораторная работа № 3

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТИВНЫХ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ

**Цель работы:** изучение работы рекуперативных кожухотрубчатых испарителей; определение коэффициента теплопередачи испарителей расчетным и опытным путем.

### Теоретическая часть

*Испарители* широко применяются для восполнения потерь конденсата в промышленных теплоэнергоустановках и для охлаждения хладоносителей – в холодильных установках. Конструктивно испарители изготавливаются в вертикальном и горизонтальном исполнении. В вертикальном испарителе греющий пар подается в межтрубное пространство, отдает теплоту нагреваемой воде и конденсируется. Нагреваемая вода за счет естественной циркуляции поднимается по трубам и закипает. В вертикальных испарителях естественная циркуляция воды в трубах возникает вследствие разности плотностей пароводяной смеси в кипящих трубах и воды в зазоре между корпусом и трубным пучком. В горизонтальных кожухотрубчатых испарителях греющий пар попадает в трубы, где конденсируется, а нагреваемая вода – в межтрубное пространство. В горизонтальных испарителях холодильных установок кипение жидкого хладагента происходит в межтрубном пространстве, а охлаждаемый хладоноситель движется по трубам. Над трубным пучком горизонтальных испарителей имеется свободное пространство, предназначенное для сепарации капель жидкости из пара.

По виду испаряемой среды испарители могут быть разделены на следующие группы:

- испарители для охлаждения жидких хладоносителей;
- испарители для охлаждения воздуха;
- испарители для охлаждения конденсирующегося хладагента (испарители-конденсаторы).

По конструктивному исполнению испарители делятся на кожухотрубчатые, кожухозмеевиковые, панельные и пластинчатые.

В зависимости от условий циркуляции охлаждаемой жидкости испарители бывают двух типов: с закрытой системой циркуляции и с открытым уровнем охлаждаемой жидкости.

По характеру заполнения хладагентом испарители делят на затопленные и незатопленные.

Кипение хладагента в испарителях может происходить как на наружной поверхности теплообмена (кожухотрубчатые затопленного типа, оросительные), так и на внутренней (кожухотрубчатые с кипением в трубах, панельные, пластинчатые).

Наибольшее распространение в холодильных установках средней и крупной производительности получили испарители кожухотрубчатые затопленного типа. В таких аппаратах хладагент кипит на наружной поверхности труб, а хладоноситель движется в трубном пространстве.

### Порядок выполнения работы

Порядок проведения работы и схема опытной установки смотреть в лабораторной работе № 2.

### Обработка результатов измерений

Результаты измерений смотреть в табл. 2.1 лабораторной работы № 2.

1. Тепловая нагрузка испарителя, кВт:

$$Q_{\text{и}} = Gc_{\text{в}}(t''_{\text{и}} - t'_{\text{и}}), \quad (3.1)$$

где  $c_{\text{в}}$  – теплоемкость воды, кДж/кг;  $G$  – расход воды через испаритель, кг/с.

2. Среднелогарифмическая разность температур, °С. Для упрощения расчетов считаем, что в испарителе происходит лишь конденсация паров. Тогда:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \Delta t_{\text{ср.пр}} \varepsilon_{\Delta t}, \quad (3.2)$$

где  $\varepsilon_{\Delta t}$  – поправочный коэффициент;  $\Delta t_{\text{ср.пр}}$  – разность температур при противотоке;

$$\Delta t_{\text{ср.пр}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}. \quad (3.3)$$

3. Площадь теплообмена, м<sup>2</sup>:

$$F = \pi d_{\text{н}} l n, \quad (3.4)$$

где  $d_{\text{н}}$  – наружный диаметр трубок, м;  $l$  – длина трубок, м;  $n$  – количество трубок.

4. Коэффициент теплопередачи испарителя:

$$K = \frac{Q_k}{F \Delta t_{cp}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (3.5)$$

5. Коэффициент теплопередачи расчетный:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{1}{\alpha_x} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3.6)$$

где  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  (см. методику расчета лабораторной работы № 2);  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности трубки принимаем по  $t_T = \frac{t_0 + t_{cp}}{2}$  (материал – медь);  $\alpha_x$  – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы кипящему хладагенту,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$\alpha_x = 0,075 \left[ 1 + 10 \left( \frac{\rho}{\rho_{п}} - 1 \right)^{-\frac{2}{3}} \right] \left( \frac{\lambda^2 \rho}{\mu T_H} \right)^{\frac{1}{3}} q^{\frac{2}{3}}, \quad (3.7)$$

где  $T_H$  – температура насыщения;  $\rho$ ,  $\rho_{п}$  – плотность жидкости и пара, соответственно, при температуре насыщения;  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  – соответственно, коэффициенты теплопроводности, динамической вязкости и поверхностного натяжения жидкости.

6. Погрешность расчета:

$$\Delta = |k - k_p|; \quad (3.8)$$

$$\delta = \frac{|k - k_p|}{k} 100, \%. \quad (3.9)$$

### Контрольные вопросы

1. Испарители. Особенности конструкции.
2. Типы испарителей. Область применения.
3. Кожухотрубчатые аммиачные испарители.
4. Кожухотрубчатые фреоновые испарители.
5. Определение коэффициента теплопередачи при кипении.
6. Уравнение теплового баланса при изменении фазового состояния теплоносителей.
7. Изменение температур теплоносителей в испарителе.

## Лабораторная работа № 4

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В СКРУББЕРЕ

**Цель работы:** изучение процессов тепло- и массообмена в насадочном газожидкостном смесительном теплообменнике (скруббере); расчет его геометрических характеристик.

#### Теоретическая часть

В различных отраслях промышленности широкое применение нашли теплообменные аппараты контактного типа, в которых тепло-массообмен между теплоносителями происходит при их непосредственном смешении. Аппараты такого типа применяются для утилизации теплоты отходящих газов, очистки воздуха или газов, в системах кондиционирования воздуха, для выпаривания растворов и т. д.

По принципу действия это, как правило, аппараты непрерывного действия. По своему назначению смесительные теплообменники можно разделить на кондиционеры, скрубберы полые, насадочные и с псевдоожиженной насадкой, барботажные и тарельчатые колонны, трубы Вентури и др.

Построение процесса обработки воздуха в скруббере строится по ступеням, условно разделяя все его пространства на  $n$  участков по вертикали (рис. 4.1), тем самым разбивая весь перепад энтальпий ( $H_1 - H_2$ ) также на  $n$  участков ( $H_1$  и  $H_2$  – энтальпии влажного воздуха на входе и выходе из скруббера). На диаграмме наносятся: точка  $A$  с начальными параметрами воздуха  $H_1$  и  $t'_1$  и точки  $C$  и  $D$ , соответствующие начальной  $t'_2$  и конечной  $t''_2$  температурам воды и относительной влажности  $\varphi = 100\%$ . От сечения к сечению происходит изменение параметров воды и влажного воздуха, и если взять достаточно большое количество участков, то можно получить плавную кривую процесса тепломассообмена между водой и воздухом.

При противоточной схеме движения воды и воздуха (в данном случае происходит осушка воздуха), представленной на рис. 4.1, изменение энтальпии на каждом участке будет равно  $\Delta H$  и полный перепад энтальпий будет  $n\Delta H = (H_1 - H_2)$ . Значение энтальпий в каждом сечении можно определить следующим образом: в сечении  $a-a$  –  $H_a = H_1 - \Delta H$ , в сечении  $b-b$  –  $H_b = H_1 - 2\Delta H$ , в сечении  $v-v$  –  $H_v = H_1 - 3\Delta H$  и т. д. В  $i$ -м сечении  $H_i = H_1 - i\Delta H$ .

Для каждого участка скруббера можно записать уравнение теплового баланса в следующем виде:

– для сечения  $a-a$ :

$$GH_1 + Wc_B t_2^a = GH_a + Wc_B t_2'', \quad (4.1)$$

где  $G$  – количество поступающего воздуха, кг/с;  $W$  – количество воды, поступающей в скруббер, кг/с;

– для сечения  $b-b$ :

$$GH_a + Wc_B t_2^b = GH_b + Wc_B t_2^a, \quad (4.2)$$

откуда

$$t_2^a = t_2'' - \frac{G\Delta H}{Wc_B}; \quad (4.3)$$

$$t_2^b = t_2^a - \frac{G\Delta H}{Wc_B}. \quad (4.4)$$

Аналогичные уравнения можно составить для последующих участков и определить температуру воды в каждом промежуточном сечении.

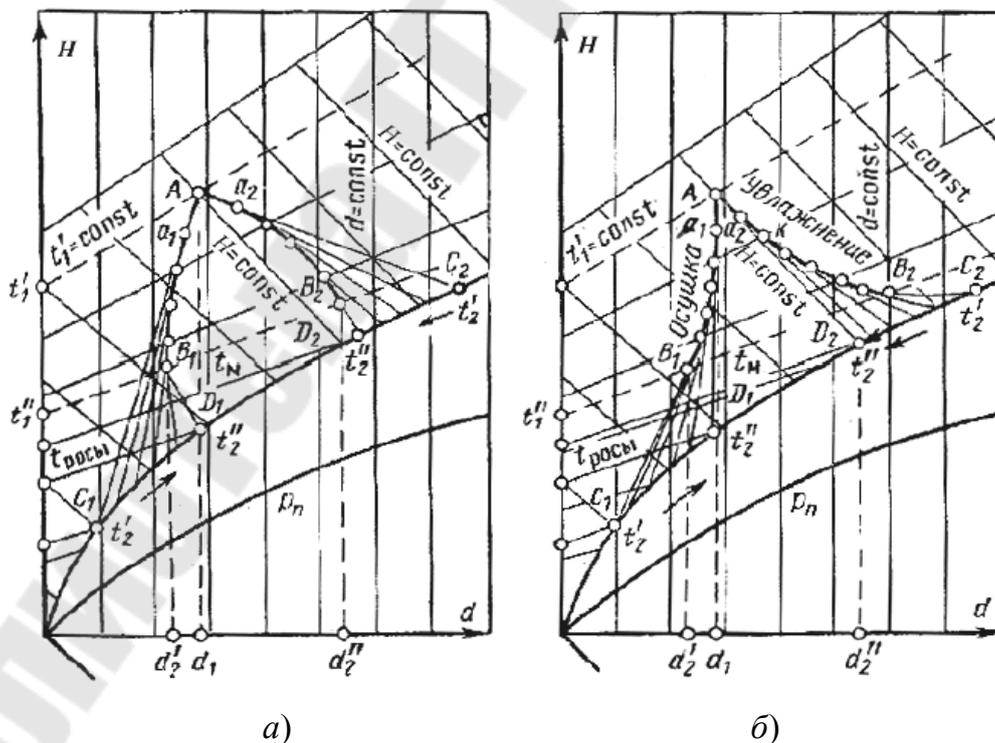


Рис. 4.1. Процессы тепло- и массообмена между воздухом и водой в скруббере при прямотоке (а) и противотоке (б)

Процесс осушки воздуха при противотоке строится следующим образом. Точка  $A$ , соответствующая начальным параметрам воздуха, соединяется с точкой  $D$ , которая определяет конечные параметры воды и является пересечением изотермы  $t_2''$  и относительной влажности  $\varphi = 100\%$ . Пересечение прямой  $AD$  и линии  $H_a = \text{const}$  даст точку  $a$ , которая соответствует параметрам воздуха в сечении  $a-a$ . Точка  $b$ , характеризующая параметры воздуха в сечении  $b-b$ , является пересечением прямой, соединяющей точку  $a$  и точку пересечения изотермы  $t_2^a$  с  $\varphi = 100\%$  и линии  $H_b = \text{const}$ . Для получения последующих точек процесса осушки воздуха рассуждения аналогичны.

Средняя разность температур в смесительных теплообменниках определяется по формуле

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{1}{\sum b / \Delta t_{\text{пр}}}, \quad (4.7)$$

где  $b$  – отношение изменения температуры воздуха в ступени к полному изменению его температуры в смесительном теплообменнике;  $\Delta t_{\text{пр}}$  – разность температур воды и воздуха для одной ступени, К.

### Порядок выполнения работы

Схема экспериментальной установки дана на рис. 4.2.

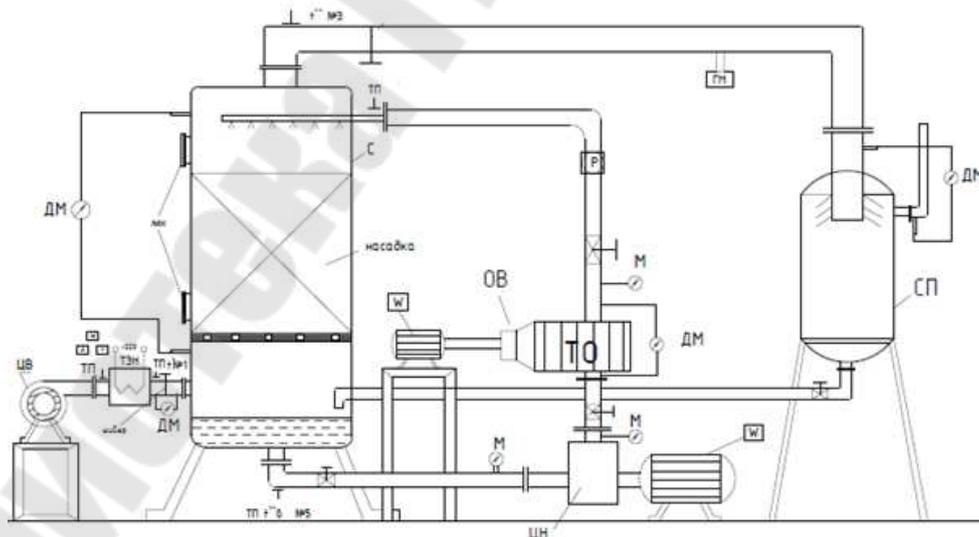


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки:

М – манометр; ДМ – дифманометр; ТП – термопара;  
 ГМ – гигрометр; ОВ – осевой вентилятор; ЦВ – центробежный  
 вентилятор; ЦН – центробежный насос; С – скруббер;  
 СП – сепаратор; Р – расходомер; ТО – теплообменник

Включить опытную установку и произвести замеры следующих параметров: количество охлаждаемого воздуха  $G$ , начальная температура  $t'$  и относительная влажность  $\varphi'$  воздуха, количество охлаждающей воды  $W$ , температура входа воды в скруббер  $t'_в$  и выхода из скруббера  $t''_в$ . Характеристики насадки: коэффициент компактности  $\beta$ , свободный объем  $x$ , приведенный диаметр  $d_\Gamma$ .

### Обработка опытных данных

Результаты измерений занесены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

#### Результаты измерений

Номер пунктов	$L$ , кг/с	$t'$ , °C	$\varphi'$ , %	$H'$ , кДж/кг	$G_в$ , кг/с	$t'_в$ , °C	$t''_в$ , °C	Насадка		
								$V$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$x$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$d_\Gamma$ , м

Энтальпию воздуха на входе в скруббер  $H'$  определяется по  $H$ - $d$ -диаграмме.

1. Из уравнения теплового баланса для скруббера определить энтальпию воздуха на выходе:

$$H'' = H' - \frac{G_в c_в^p (t''_в - t'_в)}{L}, \text{ кДж/кг}, \quad (4.8)$$

где  $c_в^p$  – массовая изобарная теплоемкость воды, кДж/кг · °C.

2. Разбить насадку скруббера на 10 участков; построить ступенчатый процесс на  $H$ - $d$ -диаграмме (как это было показано ранее), результаты свести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

#### Определение средней разности температур между теплоносителями

Номер сечения	$h^i$ , кДж/кг	$t'$ , °C	$t''_в$ , °C	$\Delta t_{np}^i$ , °C	$b = \frac{\Delta t^i}{t' - t''}$	$\Delta t^i = t' - t^{i-1}$ , °C	$\frac{b_i \cdot 10^3}{\Delta t_{np}^i}$
1							
2							
3							
...							
9							
10							

3. Определить значение числа Архимеда:

$$Ar = \frac{d^3 \rho \rho_B g}{\mu^2}, \quad (4.9)$$

где  $\rho$  и  $\rho_B$  – плотности воздуха и воды, соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

Число Рейнольдса:

$$Re = 0,045 Ar^{0,57} \left( \frac{L}{G_B} \right)^{0,43}. \quad (4.10)$$

4. Скорость газа в насадочной колонне при работе в режиме начала подвисяния:

$$u' = \frac{Re \beta \mu}{4\rho}, \quad \text{м/с}. \quad (4.11)$$

5. Принять скорость воздуха в свободном сечении  $u = 0,5u'$  м/с.

6. Тогда диаметр скруббера:

$$D = \sqrt{\frac{4L}{\pi u \rho}}, \quad \text{м}. \quad (4.12)$$

7. Определить коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний:

$$\beta_d = 0,0047 \left( \frac{\rho u}{\nu} \right)^{0,8} d_r^{-0,2}, \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (4.12)$$

8. Используя соотношение Льюиса, определить коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = c_{\text{возд}}^p \beta_d, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4.13)$$

где  $c_{\text{возд}}^p$  – изобарная массовая теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

9. Необходимая площадь поверхности насадки:

$$F = \frac{Q_{\text{возд}}}{\alpha \Delta t} = \frac{L c_{\text{возд}}^p (t' - t'')}{\alpha \Delta t}, \quad \text{м}^2. \quad (4.14)$$

10. Объем насадки:

$$V = \frac{F}{\beta}, \quad \text{м}^3. \quad (4.15)$$

11. Действительный объем насадки определить с учетом запаса 20 %:

$$V_d = 1,2V, \text{ м}^3. \quad (4.16)$$

12. Высота насадки:

$$h = \frac{4V_d}{\pi D^2}, \text{ м}. \quad (4.17)$$

### Контрольные вопросы

1. Что такое смесительный теплообменник? Преимущества смесительных теплообменников.
2. Классификация смесительных теплообменников.
3. Что собой представляют полые и насадочные скрубберы?
4. Какие бывают типы насадок? Основные требования, предъявляемые к насадкам.
5. Уравнение теплового баланса скруббера.
6. Как построить процессы тепло- и массообмена в скруббере между воздухом и водой?
7. Определение среднего температурного напора.

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНВЕКТИВНОМ СПОСОБЕ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ

**Цель работы:** исследование кинетики сушки твердого дисперсного материала и расчет продолжительности сушки.

#### Теоретическая часть

Сушка представляет собой процесс обезвоживания сырья, материалов и изделий с поверхности или из внутренних слоев путем испарения (тепловая сушка), отжатия, центрифугирования (механическая сушка) или поглощения влаги гигроскопическими материалами (физико-химическая сушка). Наибольшее распространение получил тепловой или термический способ сушки, когда к высушиваемому материалу подводится теплота.

В зависимости от способа подвода теплоты сушильные установки бывают: конвективные, кондуктивные, радиационные, электромагнитные, комбинированные.

По способу действия и по конструкции сушильные установки делятся на установки непрерывного действия, периодического, полупрерывного; барабанные, шахтные, камерные, туннельные, ленточные, кипящего слоя и т. д. Наибольшее распространение в промышленности получили конвективные сушильные установки непрерывного действия.

В качестве сушильного агента в конвективных сушильных установках применяют воздух, топочные газы, перегретый водяной пар, гелий, азот и так далее, направление движения которых относительно высушиваемого материала может быть прямоточным, противоточным, перекрестноточным, реверсивным. По давлению сушильного агента они могут выполняться атмосферными и вакуумными. Теплота для сушки материалов в них передается конвекцией от горячего газообразного сушильного агента к влажному материалу. Сушильный агент одновременно служит не только теплоносителем, но и влагопоглотителем, поскольку уносит из сушильной установки образовавшиеся в процессе сушки пары влаги.

Измерения во времени средних по объему высушиваемого материала влагосодержания  $\omega^c$  и температуры  $t$  называются *кинетикой сушки*.

Закономерности  $\omega^c = f(\tau)$  и  $t = f(\tau)$  кладут в основу определения продолжительности сушки до заданного конечного влагосодержания, количества испаренной влаги и теплоты на сушку. Графическая зависимость  $\omega^c = f(\tau)$  называется *кривой сушки*.

Изменение влагосодержания в единицу времени  $d\omega^c/d\tau$  называется *скоростью сушки*, а графические зависимости вида  $d\omega^c/d\tau = f(\omega^c)$  и  $d\omega^c/d\tau = f(\tau)$  – *кривыми скорости сушки*. Эти графические зависимости представлены на рис. 5.1.

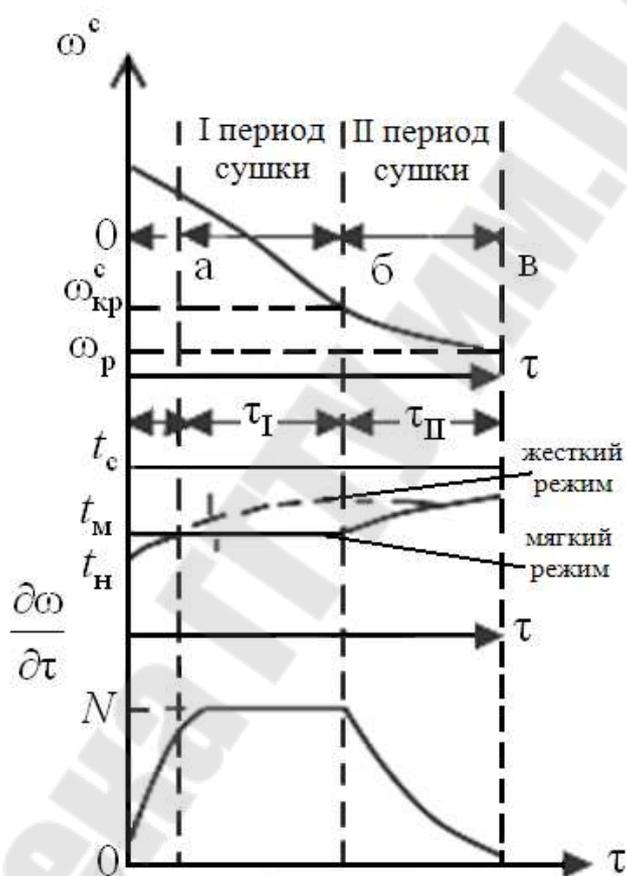


Рис. 5.1. Типичные кривые сушки, скорости сушки и изменение температуры материала при конвективном способе подвода теплоты

Количество содержащейся в материале влаги, которая находится в равновесии с насыщенной газообразной средой ( $\phi = 1$ ), определяет гигроскопическое влагосодержание  $\omega_r^c$ .

Равновесной влагой называют ту часть общей влаги в материале, которая не может быть удалена при данных условиях сушки  $\omega_p^c$ .

## Порядок выполнения работы

Схема сушильной установки дана на рис. 5.2.

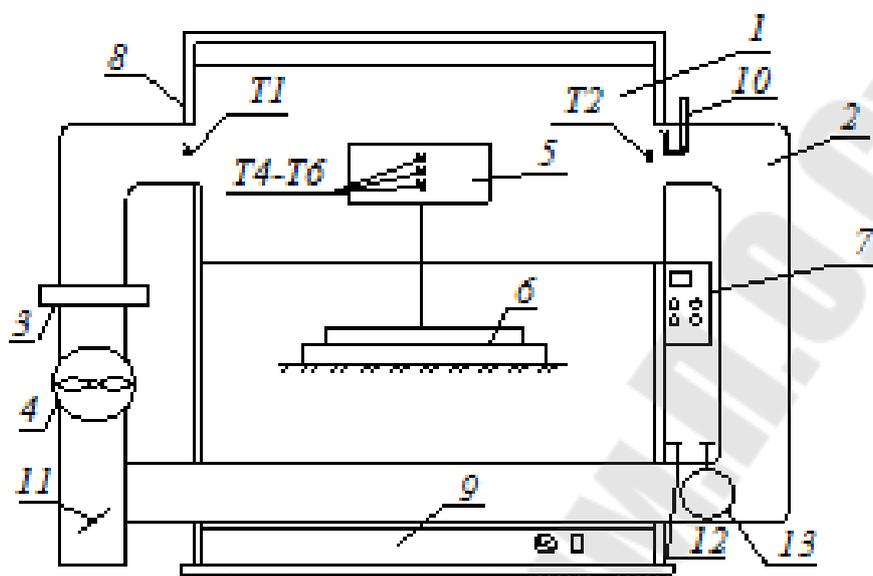


Рис. 5.2. Схема сушильной установки:

1 – сушильная камера; 2 – воздуховод; 3 – нагреватель;  
4 – вентилятор; 5 – исследуемый образец; 6 – электронные весы;  
7 – пульт управления; 8 – стойка; 9 – блок питания; 10 – баллон для увлажнения термомпар;  
11, 12, 13 – регулируемые заслонки;  
T1–T6 – термомпары, измеряющие следующие температуры:  
T1, T2 – температуры воздуха на входе и выходе из сушильной камеры, °С; T3 – температура «мокрого» термометра в сушильной камере, °С; T4–T6 – температуры образца, °С

1. Проверить установку.
2. Вставить вилку в розетку и включить автомат.
3. Выбрать испытуемый образец.
4. Включить весы, установить 0. Взвесить сухой образец.
5. Увлажнить образец дистиллированной водой до предельной влажности.
6. Включить теплоизмерительный прибор.
7. Включить подачу рабочего напряжения на нагреватель и вентилятор.
8. Установить режим работы нагревателя и вентилятора.
9. Заслонками отрегулировать скорость воздуха и температуру.
10. Дать установке поработать до выхода на стационарный режим.
11. Установить в исследуемый образец термомпары, а данный образец – в камеру сушки.

12. Зафиксировать вес образца.
13. Запустить на ПК файл owen.exe и начать процесс.
14. Засечь время начала опыта.
15. Зафиксировать время уменьшения массы образца на 0,5 г.
16. По окончании опыта сохранить результаты измерений на компьютере в виде графика и таблицы.

### Обработка опытных данных

1. Начальная влажность образца, г:

$$w_0 = m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}}, \quad (5.2)$$

где  $m_{\text{вл}}$  – масса влажного образца, г;  $m_{\text{сух}}$  – масса сухого образца, г.

2. Влажность в  $i$ -й момент времени, г:

$$w_i = w_0 - n \cdot \Delta m, \quad (5.3)$$

где  $\Delta m$  – фиксированное изменение массы образца, г ( $\Delta m = 0,5$  г);  $n$  – номер измерения.

3. Влагосодержание образца, %:

$$\omega_i = \frac{w_i}{m_{\text{сух}}} 100 \%. \quad (5.4)$$

4. Скорость сушки:

$$\frac{d\omega_i}{d\tau} = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}}, \quad (5.5)$$

где  $\tau_i$  – время  $i$ -го измерения.

5. По результатам опыта построить кривые кинетики сушки и графическим методом определить  $\omega_{\text{кр}}$ ,  $\omega^*$  (критическое и равновесное влагосодержание).

6. Определим коэффициент  $N$ :

$$N = \arctg\left(\frac{\omega_0 - \omega_{\text{кр}}}{\tau_{ki} - \tau_{hi}}\right), \quad (5.6)$$

где  $\tau_{hi}$ ,  $\tau_{ki}$  – время начала и окончания периода постоянной скорости сушки, мин.

7. По заданию преподавателя произвести аппроксимацию полученных данных.

8. Определить общее время сушки до заданного конечного влагосодержания  $\omega_k$ . При линейной зависимости скорости сушки во втором периоде от времени:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{N} \left[ (\omega_0 - \omega_{кр}) + (\omega_{кр} - \omega^*) \ln \frac{\omega_{кр} - \omega^*}{\omega_k - \omega^*} \right]. \quad (5.7)$$

9. Построить графики зависимости:  $\omega = f(\tau)$ ;  $t_{обр} = f(\tau)$   
и  $\frac{d\omega_i}{d\tau} = f(\tau)$ .

10. Построить единую кривую сушки.

11. Температура образца, °C:

$$t_{обр} = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}. \quad (5.8)$$

Результаты измерений и расчетов занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Результаты измерений и расчетов**

$\tau, c$	$m_{вл}, \Gamma$	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$t_3, ^\circ C$	$t_4, ^\circ C$	$t_5, ^\circ C$	$t_6, ^\circ C$	$w_i$	$\omega_i$	$\frac{d\omega_i}{d\tau}$	$t_{обр}, ^\circ C$
1											
2											
...											
$n$											

### Контрольные вопросы

1. Что представляет собой процесс сушки?
2. Классификация сушильных установок.
3. Классификация сушимых материалов, способы их сушки.
4. Что такое кинетика сушки, кривая сушки, влагосодержание?
5. Характеристика различных периодов сушки.
6. Что такое равновесное влагосодержание, как определяются критическое влагосодержание, критическое приведенное влагосодержание?
7. Как определяется продолжительность сушки?

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

**Цель работы:** определение коэффициентов массоотдачи в паровой и жидкой фазах при ректификации бинарных смесей.

#### Теоретическая часть

Перегонка и ректификация широко распространены во многих отраслях промышленности и применяются для получения разнообразных продуктов в практически чистом виде путем разделения их жидких смесей (в производствах органического синтеза изотопов, полимерных и полупроводниковых материалов, пищевых продуктов и т. д.), а также для получения чистых газов из сжиженных газовых смесей (кислорода и азота, при разделении воздуха, углеводородных газов и т. п.).

*Перегонкой* называется процесс частичного испарения разделяемой исходной смеси жидкостей и последующей полной конденсации образующихся паров, осуществляемой однократно или многократно. Составы жидкой и паровой фаз, образующихся при этом, как правило, заметно различаются, но все компоненты исходной смеси оказываются представленными в обеих разделившихся фазах. Поэтому с помощью перегонки нельзя получить (выделить) требуемые компоненты исходного раствора в практически чистом виде.

Получение чистых компонентов может быть осуществлено с помощью *ректификации* – процесса разделения растворов жидкостей на практически чистые компоненты путем испарения за счет возвращения в аппарат части получаемого продукта для осуществления многократного теплообмена между парами, движущимися противотоком, и жидкостью.

Физическая сущность этого процесса – двусторонний тепло- и массообмен между противоточно движущимися неравновесными фазами пара и жидкости при высокой турбулизации контактирующих потоков, когда с каждым соприкосновением жидкости и пара частично конденсируются пары, а жидкость за счет теплоты конденсации паров частично испаряется. Таким образом, пары при движении вверх обогащаются низкокипящими, а жидкость, опускаясь вниз, высококипящими компонентами. Благодаря многократному контакту фаз, можно получить практически чистые пары низкокипящих компонентов и жидкость из высококипящих компонентов.

Состав паров в процессах перегонки и ректификации определяется различной фугитивностью (летучестью) компонентов при одной и той же температуре. Исходя из этого, различают низкокипящие (легколетучие) и высококипящие (труднолетучие) компоненты. Низкокипящий компонент имеет наибольшее давление паров при данной температуре по сравнению с давлением паров любого другого компонента смеси и, соответственно, наименьшую температуру кипения при одинаковом для всех компонентов давлении. Компонент, обладающий наименьшим давлением или наивысшей температурой кипения, называется высококипящим компонентом. Неиспарившаяся в результате перегонки или ректификации высококипящая жидкость называется остатком, а низкокипящая жидкость, полученная в результате конденсации паров, – *дистиллятом* или *ректификатом*.

Ректификационные установки, как и перегонные, по принципу действия разделяются на периодические и непрерывные. В установках периодического действия разделяемую смесь загружают в куб одновременно и ректификацию проводят до получения продуктов заданного конечного состава. В установках непрерывного действия разделяемая сырая смесь поступает в колонну и продукты разделения выводятся из нее непрерывно.

Как перегонные, так и ректификационные установки могут применяться для разделения бинарных и многокомпонентных смесей.

Рассмотрим принцип работы ректификационной установки для разделения бинарной смеси и происходящие в ней процессы тепло- и массообмена (см. рис. 4.1).

В перегонном кубе I за счет подводимой теплоты кипит жидкость. Пары ее поднимаются по колонне II вверх навстречу жидкости, вводимой на одну из промежуточных тарелок из исходного бака и на верхнюю тарелку из сепаратора IV. Из верхней части колонны богатые низкокипящим компонентом пары выходят в теплообменник-дефлегматор III, конденсируются, отдавая теплоту охлаждающей воде, и в виде парожидкостной смеси поступают в сепаратор. Из сепаратора часть жидкости, которая называется *флегмой*, возвращается в колонну. Другая часть, называемая ректификатором, через холодильник V поступает на склад.

Процессы тепло- и массообмена в ректификационной колонне происходят на тарелках или насадке. Флегма из сепаратора IV в колонне вступает в контакт с парами, образующимися в кубе I. При этом происходит частичная конденсация поднимающихся вверх паров

и частичное испарение опускающейся жидкости. Таким образом, в процессе ректификации флегма вступает в тепло- и массообмен с парами. За счет теплоты конденсации паров высококипящего компонента из флегмы испаряется низкокипящий компонент, а сама флегма обогащается высококипящим компонентом, пары же, наоборот, поднимаясь, обогащаются низкокипящим компонентом за счет испарений его из флегмы и обедняются высококипящим компонентом. В результате массообмена производится глубокое разделение бинарных и многокомпонентных смесей.

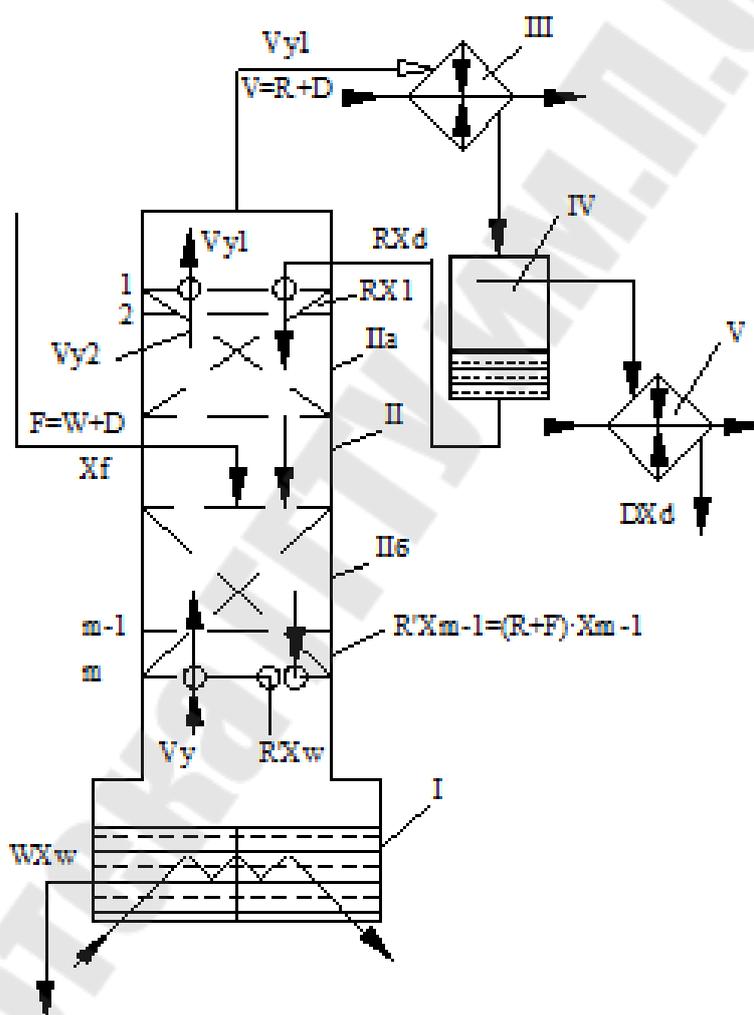


Рис. 6.1. Принципиальная схема ректификационной колонны с материальными потоками для разделения бинарной смеси

Количество флегмы, кг, приходящейся на 1 кг готового продукта, называется *флегмовым числом*. Оно может меняться в зависимости от способа ректификации и интенсивности тепло- и массообмена на отдельных тарелках.

Та часть колонны, где вводится сырая смесь, называется *питающей секцией*. Часть колонны, находящаяся выше места ввода сырой смеси, называется *укрепляющей секцией* Па, а ниже – *исчерпывающей секцией* Пб.

### Исходные данные и их обработка

Определить коэффициенты массоотдачи в паровой и жидких фазах при ректификации смеси «бензол–толуол» в колонне с сетчатыми тарелками. Колонна работает при следующих условиях: расход пара  $V$ , кмоль/ч; расход жидкости  $L$ , кмоль/ч; молярная доля низкокипящего компонента в паровой фазе  $y$ ; молярная доля низкокипящего компонента в жидкой фазе  $x$ ; средняя температура в колонне  $t$ , °С; диаметр колонны  $d$ , мм. Исходные данные сводим в табл. 6.1. Коэффициент диффузии толуола в жидкой фазе  $D_{ж} = 1,55 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/ч; коэффициент диффузии бензола в паровой фазе  $D_{п} = 1,63 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/ч. Температура кипения толуола  $t_{\text{толуола}} = 111$  °С; температура кипения бензола  $t_{\text{бензола}} = 80$  °С; молекулярные массы толуола  $M_{\text{толуола}} = 92,13$  кг/кмоль и бензола  $M_{\text{бензола}} = 78,11$  кг/кмоль.

Результаты измерений занесены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений

$V$ , кмоль/ч	$L$ , кмоль/ч	$y$ , %	$x$ , %	$t$ , °С	$d$ , мм

Определение коэффициента массоотдачи в паровой фазе:

1. По средней температуре в колонне  $t$ , °С определить теплофизические свойства веществ.

2. Рассчитать среднюю массу пара:

$$M = M_{\text{бензола}}y + M_{\text{толуола}}(1 - y), \text{ кг/кмоль.} \quad (6.1)$$

3. Определить плотность пара по формуле для идеального газа:

$$\rho_{п} = \frac{MP}{R(t + 273)}, \quad (6.2)$$

где  $P = 1,01325 \cdot 10^6$  – давление в колонне, Па;  $R = 8,314 \cdot 10^3$  – универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль · К.

4. Число Шмидта:

$$Sc = \frac{3600 \cdot \mu_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} D_{\text{п}}}, \quad (6.3)$$

где  $\mu_{\text{п}}$  – динамическая вязкость пара, Па · с;  $\rho_{\text{п}}$ ,  $D_{\text{п}}$  – плотность, кг/м<sup>3</sup> и коэффициент диффузии паровой фазы, м<sup>2</sup>/ч, соответственно.

5. Определяющий линейный размер:

$$l = \left( \frac{2\sigma_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot 9,81} \right)^{0,5}, \quad (6.4)$$

где  $\sigma_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  – поверхностное натяжение, Н/м и плотность, кг/м<sup>3</sup> жидкости, соответственно.

6. Определить скорость пара в колонне, м/с:

$$w = \frac{V \cdot 22,4(273 + t)}{3600(\pi d^2 / 4)273}. \quad (6.5)$$

7. Тогда число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \rho_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}}}. \quad (6.6)$$

8. Число Шервуда для указанной колонны:

$$Sh = 2 Re^{0,9} \cdot Sc^{0,25}. \quad (6.7)$$

9. Коэффициент массоотдачи в паровой фазе, м/ч:

$$\beta_y = \frac{Sh D_{\text{п}}}{l}. \quad (6.8).$$

Определение коэффициента массоотдачи в жидкой фазе:

1. При  $l = 1$  м число Шмидта:

$$Sc = \frac{3600 \cdot \mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} D_{\text{ж}}}. \quad (6.9)$$

2. Число Шервуда для указанной колонны:

$$Sh = 3,8 \cdot 10^4 \cdot Sc^{0,62}. \quad (6.10)$$

3. Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/ч:

$$\beta_y = \frac{Sh D_{\text{ж}}}{l}. \quad (6.11)$$

## Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие процессов перегонки и ректификации? Физическая сущность ректификации.

2. Дать определение понятий: остаток, ректификат, флегма, флегмовое число.

3. Принцип работы ректификационной установки.

4. Перечислить, какие типы смесей выделяются в зависимости от растворимости компонентов. Закон Дальтона, закон Рауля, относительная летучесть.

5. Фазовая диаграмма и диаграмма равновесия.

6. Материальный баланс.

7. Уравнения рабочих линий, построение рабочих линий.

## Лабораторная работа № 7

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕПРЕССИЙ РАСТВОРА

**Цель работы:** изучение работы выпарных установок с определением температурных депрессий.

#### Теоретическая часть

Выпариванием называется термический процесс концентрирования растворов нелетучих веществ, заключающийся в удалении из них летучего растворителя в виде пара при кипении или испарении. Выпаривание применяют для увеличения концентрации растворов (концентрирование) при производстве сахара, поваренной соли, аммиачной селитры, щелочных металлов, минеральных удобрений, минеральных солей, органических полупродуктов, кормовых дрожжей и т. д.

При кипении растворов нелетучих веществ в паровую фазу переходит только растворитель и по мере испарения растворителя и его удаления концентрация раствора повышается.

Концентрацией раствора  $x$  называется отношение массы растворенного твердого вещества к массе раствора. Концентрация растворенного вещества выражается либо в долях, либо в процентах общей массы раствора:

$$x = \frac{G_{\text{сух}}}{G_{\text{сух}} + W} \text{ или } x = \frac{G_{\text{сух}}}{G_{\text{сух}} + W} 100 \%, \quad (7.1)$$

где  $G_{\text{сух}}$  – количество сухого растворенного вещества, кг/кг;  $W$  – количество растворителя в растворе, кг/кг.

Раствор, содержащий предельное количество растворенного вещества, называется насыщенным.

Растворимостью называется отношение количества растворенного вещества к общей массе раствора или к массе растворителя. Растворимость зависит от температуры и практически не изменяется при изменении давления.

С увеличением концентрации раствора при выпаривании изменяются также теплофизические свойства раствора: плотность и вязкость увеличиваются, понижаются удельная теплоемкость, теплопроводность и теплоотдача.

В промышленности выпаривают преимущественно водные растворы различных веществ, поэтому в дальнейшем рассматривается только выпаривание водных растворов.

На современных предприятиях выпаривание ведут, как правило, в многокорпусных (многоступенчатых) установках непрерывного действия с выпарными аппаратами поверхностного типа. Если образующийся в выпарном аппарате пар используется в последующем корпусе с более низким давлением в качестве греющего, то его называют вторичным паром. Если часть вторичного пара передается другим тепловым потребителям, то его называют экстра-паром.

Как известно, раствор кипит при более высокой температуре, чем растворитель. Таким образом, при кипении раствора температура выделяющегося пара будет меньше температуры кипения раствора и эту разность температур называют физико-химической температурной депрессией  $\Delta'$ :

$$\Delta' = t_p - t_{\text{п}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.2)$$

где  $t_p$  – температура кипения раствора,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{п}}$  – температура паров растворителя,  $^\circ\text{C}$ .

В технической литературе приводятся сведения по температурам кипения растворов различных концентраций, как правило, при атмосферном давлении  $\Delta'_{\text{атм}}$ , которую легко определить по справочникам. При других давлениях  $\Delta'$  находят с помощью уравнения И. А. Тищенко:

$$\Delta' = 0,01622 \frac{T^2}{r} \Delta'_{\text{атм}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.3)$$

где  $T$  – абсолютная температура кипения растворителя (воды) при данном давлении, К;  $r$  – удельная теплота парообразования чистого растворителя при данном давлении, кДж/кг.

Гидростатической депрессией  $\Delta''$  называется разность между температурами кипения нижних и верхних слоев раствора в выпарном аппарате. Нижние слои раствора, находящиеся под гидростатическим давлением верхних слоев, закипают при более высокой температуре, чем верхние. Гидростатическая депрессия проявляется лишь в аппаратах с кипением раствора в кипятильных трубах нагревательной камеры. В этом случае за температуру кипения раствора принимают температуру кипения в средней части кипятильных трубах:

$$\Delta'' = t_{\text{ср}} - t_{\text{в.п}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.4)$$

где  $t_{\text{ср}}$  – температура кипения растворителя при давлении  $p_{\text{ср}}$  в средней части кипятильных труб,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{в.п}}$  – температура вторичного пара при давлении в аппарате  $p_{\text{а}}$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Гидравлической депрессией  $\Delta'''$  называется снижение температуры, связанное с потерей давления на трение, и местные потери в трубопроводах, соединяющих корпуса выпарной установки. В практических расчетах ее принимают равной 1–1,5  $^\circ\text{C}$ .

Полная температурная депрессия  $\Delta$  равна сумме физико-химической, гидростатической и гидравлической депрессий:

$$\Delta = \Delta' + \Delta'' + \Delta''', \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7.5)$$

В качестве греющего теплоносителя для выпарных установок применяют водяной пар от заводской котельной или из отборов паровых турбин с давлением 0,5–1,0 МПа и температурой 140–180  $^\circ\text{C}$ . При необходимости получения более высоких температур для выпаривания могут быть использованы высокотемпературные теплоносители (дифенильная смесь, минеральные масла, кремнийорганические соединения) или трубчатые электрические нагреватели (ТЭН).

В качестве хладоносителя для конденсации вторичных паров из последней ступени выпарной установки в конденсаторах используют, как правило, охлаждающую воду из водоемов (рек, озер, брызгального бассейна, градирен). В районах с дефицитом воды в последнее время стали применять конденсаторы с воздушным охлаждением.

### **Порядок выполнения работы**

Общий вид установки показан на рис. 7.1.

#### ***Технические характеристики установки***

1. Габариты: высота – 2200 мм; длина – 800 мм; ширина – 900 мм.
  2. Рабочее напряжение – 220 В.
  3. Мощность нагревателя – 0,65 кВт.
  4. Насос/расход – 2, 4, 6 м<sup>3</sup>/ч.
  5. Объем бака хранения – 10 л.
  6. Время разогрева раствора до 100  $^\circ\text{C}$  – 85 мин.
- Производительность по выпариванию воды – до 0,15 г/с.

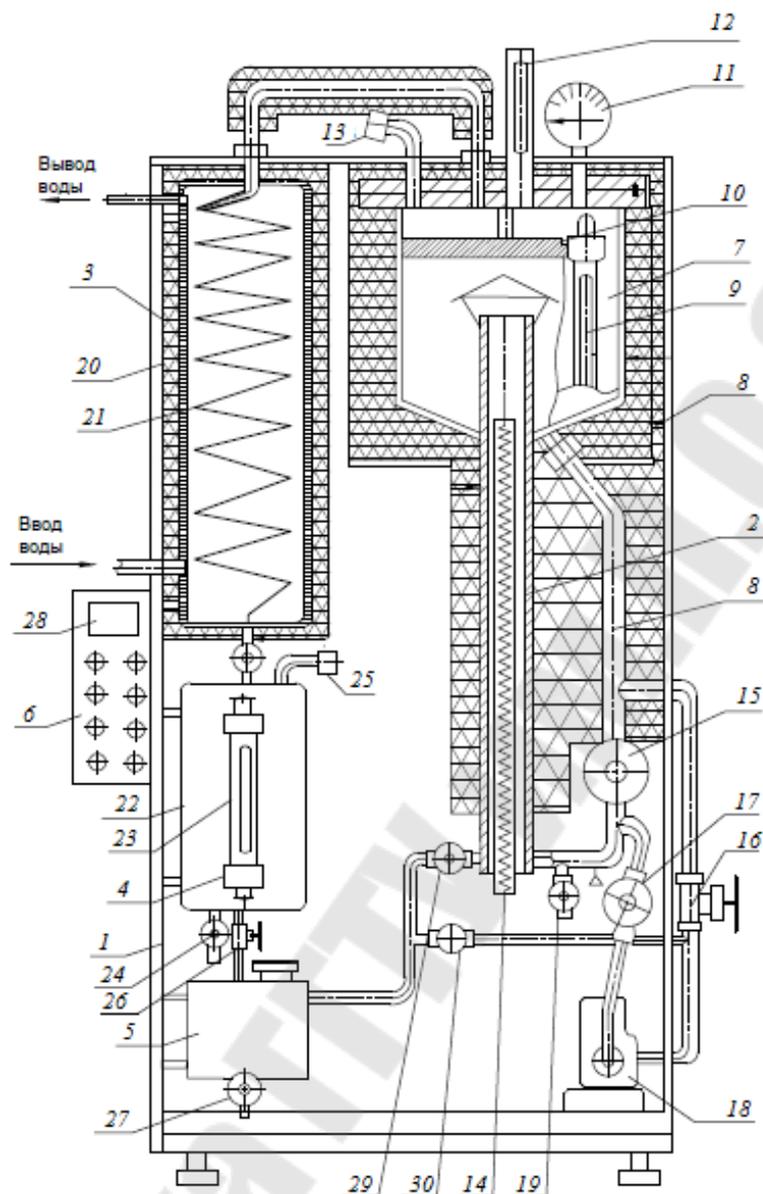


Рис. 7.1. Схема установки для выпаривания:

- 1 – стойка; 2 – камера для выпаривания; 3 – холодильная камера;  
 4 – бак накопительный; 5 – бак для хранения раствора; 6 – пульт управления; 7 – емкость для упаривания; 8 – циркуляционный контур; 9 – трубка уровня раствора; 10 – сепаратор; 11 – манометр; 12 – термометр; 13 – заглушка для выпуска воздуха;  
 14 – электрический нагревательный элемент; 15, 16, 17 – вентили; 18 – циркуляционный насос; 19 – вентиль для отбора проб раствора; 20 – бак холодильной камеры; 21 – змеевик; 22 – емкость накопительного бака; 23 – стеклянная измерительная трубка уровня жидкости; 24 – вентиль для отбора жидкости при измерении скорости выпаривания; 25 – заглушка для выпуска воздуха; 26 – вентиль для слива из накопительного бака; 27 – сливной вентиль; 28 – прибор измерительный типа «ТРМ 138»;  
 29, 30 – вентили

Перед началом проведения работы следует проверить вентили: вентили 16, 19, 24, 26, 27, 29 и 30 должны быть закрыты; вентили 15 и 17 – открыты; пробка 25 должна иметь отверстие; открыть вентиль на сливе охлаждающей воды конденсатора, затем на подаче проверить наличие воды. Затем закрыть вентили.

Порядок работы:

1. Подготовить раствор:

а) открыв вентиль 26, слить конденсат в бак для хранения, закрыть вентиль 26;

б) открыть вентиль 29 и слить раствор из камеры выпаривания (следить за тем, чтобы бак для хранения раствора не был переполнен);

в) открыть вентиль 30, вентиль 15 закрыть;

г) включить насос и закачать нужное количество раствора в камеру для выпаривания 1. Количество раствора контролируется по стеклянной трубке (не более половины мерного стекла). Закрыть вентиль 30 и выключить насос 18;

д) для хорошего перемешивания раствора повторить пп. б–г 2–3 раза.

2. Выбрать режим работы выпарной установки. Для проведения процесса выпаривания с естественной циркуляцией необходимо открыть вентиль 15, вентили 16 и 17 должны быть закрыты, а насос 18 выключен. Для проведения процесса выпаривания с принудительной циркуляцией необходимо вентиль 15 закрыть, вентили 16 и 17 открыть, а насос 18 включить.

3. Включить ТЭН тумблером 14.

4. Взять пробу раствора объемом 100 мл, открыв вентиль 19.

5. Включить прибор ТРМ 138.

6. Открыть файл open.exe на компьютере, запустить процесс.

7. После разогрева раствора до 95 °С включить подачу охлаждающей воды.

8. Засечь время начала процесса выпаривания (о начале выпаривания можно судить по быстрому росту температуры  $T_4$  из-за начала интенсивного парообразования).

9. Проводить процесс выпаривания 20–30 мин. При этом замерить температуры.

10. Выключить ТЭН и засечь время окончания процесса выпаривания (в режиме принудительной циркуляции выключить насос).

11. Через 5 мин отключить охлаждающую воду (*сначала закрывается вентиль на подаче, а затем на сливе!*).

12. Взять пробу выпаренного раствора (100 мл). Для этого осторожно приоткрыть вентиль 19. Отбор пробы производится преподавателем или мастером! При этом следует быть осторожным и производить его в специальных рукавицах, так как раствор имеет температуру 95 °С и при попадании на кожу вызовет ожог.

13. Охладить пробу до 20 °С.

14. Взвесить две пробы и пустой стакан.

15. Определить объем выпаренной воды путем слива из накопительного бака 4. После определения объема залить конденсат обратно в бак 4.

16. Пробы растворов залить в бак 6.

17. Отключить прибор ТРМ 138 и установку.

18. Сохранить на компьютере график температур и таблицу с их значениями. Выключить компьютер.

19. Привести в порядок оборудование.

### Обработка опытных данных

Результаты измерений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Результаты измерений

Объем пробы $V_p$ , мл	Масса пробы		Продолжительность выпаривания $\tau$ , мин	Масса пустого стакана $m_c$ , г	$t_1$ , °С	...	$t_8$ , °С
	исходного раствора, $m_{и.р}$ , г	выпаренного раствора, $m_{в.р}$ , г					

1. Определяем экспериментальные значения температурных депрессий:

– физико-химическая:

$$\Delta'_9 = t_6 - t_5, \text{ °С}; \quad (7.6)$$

– гидростатическая:

$$\Delta''_9 = t_7 - t_6, \text{ °С}; \quad (7.7)$$

– гидравлическая:

$$\Delta'''_9 = t_5 - t_4, \text{ °С}. \quad (7.8)$$

2. Производительность установки по выпаренной воде, г/мин:

$$G_w = \frac{V_k}{\tau}. \quad (7.9)$$

Определяем плотности исходного и выпаренного раствора:

$$\rho_{и.р} = \frac{m_{и.р}}{V_{п}}, \text{ г/см}^3; \quad (7.10)$$

$$\rho_{в.р} = \frac{m_{в.р}}{V_{п}}, \text{ г/см}^3. \quad (7.11)$$

По плотности глицерина определяем его концентрации  $\omega_{ир}$  и  $\omega_{в.р}$ , %.

Определяем расчетные значения температурных депрессий:

а) физико-химическая:

$$\Delta'_p = C_m E, \quad (7.12)$$

где  $C_m$  – мольное содержание глицерина в воде, моль/кг;  $E$  – эбулиоскопический коэффициент (для водных растворов  $E = 0,528$ );

$$C_m = \frac{\omega_H}{(100 - \omega_H)\mu_T}, \quad (7.13)$$

где  $\mu_T$  – молярная масса глицерина ( $\mu_T = 0,092$  кг/моль);

б) гидростатическая:

$$\Delta''_p = t_7^p - t_6^p, \quad (7.14)$$

где  $t_6^p$ ,  $t_7^p$  – температуры кипения при давлении окружающей среды и в середине нагревательной камеры, °С;

в) гидравлическая:

$$\Delta'''_p = t_5^p - t_4^p, \quad (7.15)$$

где  $t_5^p$  – температура кипения воды при давлении окружающей среды, °С;  
 $t_4^p$  – температура кипения воды при давлении в конденсаторе, °С, которая определяется по давлению в конденсаторе, равному:

$$p_k = p_{о.с} - \Delta p, \quad (7.16)$$

где  $\Delta p$  – потери давления в паропроводе:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_{\text{п}} v^2}{2} + \sum \xi \frac{\rho_{\text{п}} v^2}{2}, \quad (7.17)$$

где  $\lambda$  – коэффициент Дарси;  $l$ ,  $d$  – длина и диаметр трубопровода, м;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость пара, м/с;  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных потерь.

6. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. Сущность процесса выпаривания, области его практического применения.
2. Как определяется концентрация растворенного вещества?
3. Что такое насыщенный раствор?
4. Что такое растворимость?
5. Что такое вторичный пар, экстра-пар?
6. Что такое полезная и располагаемая разность температур?
7. Физико-химическая депрессия.
8. Гидростатическая депрессия.
9. Гидравлическая депрессия.
10. Классификация выпарных установок.
11. Чем необходимо руководствоваться, чтобы правильно спроектировать выпарную установку

## Лабораторная работа № 8

### ИСПЫТАНИЕ ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

**Цель работы:** испытание парокомпрессионной одноступенчатой холодильной установки на различных режимах; определение основных ее характеристик; сравнительный анализ ее работы на различных режимах.

#### Теоретическая часть

Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной установки приведена на рис. 8.1. В установках такого типа процессы протекают в области влажного пара, что позволяет реальные циклы этих установок максимально приблизить к циклу Карно. Цикл одноступенчатой парокомпрессионной установки представлен на рис. 8.2.

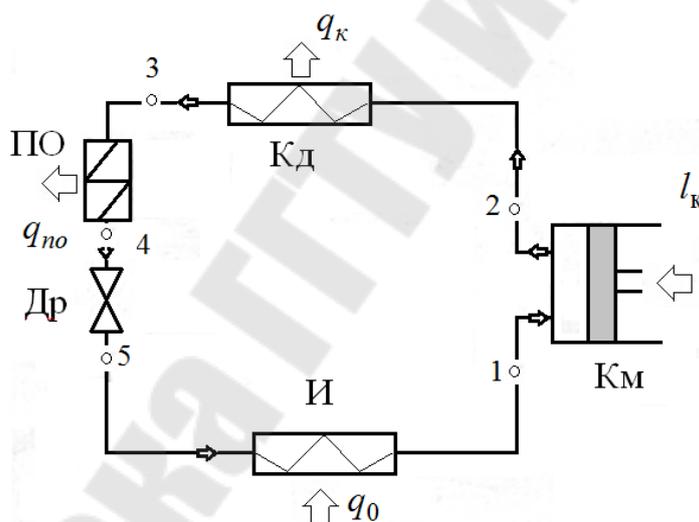


Рис. 8.1. Принципиальная схема парокомпрессионной установки

Пары хладагента в состоянии, характеризуемом точкой  $1$ , поступают в компрессор  $КМ$ , где при подводе извне работы  $l_k$  происходит сжатие пара до давления  $p_k$ . В конденсаторе  $КД$  пары охлаждаются до температуры  $t_k$ , а затем при этой температуре происходит их конденсация. В переохладителе  $ПО$  жидкость охлаждается до температуры  $t_4$  за счет источника холода с более низкой температурой, чем  $t_k$ . Далее жидкость поступает в дроссель  $Др$ , дросселируется

понижением давления с  $p_k$  до  $p_0$  и температуры до  $t_0$ . В состоянии, характеризуемом точкой 5, рабочее тело поступает в испаритель И, в котором к нему подводится теплота  $q_0$  от охлаждаемого объекта, испаряется и пары поступают во всасывающий патрубок компрессора. Параметры цикла в характерных точках легко определить из диаграммы  $T-S$  или  $\lg p-h$ . Отсутствие переохлаждения 3–4 снижает холодопроизводительность установки, так как процесс дросселирования заканчивается в точке 5'.

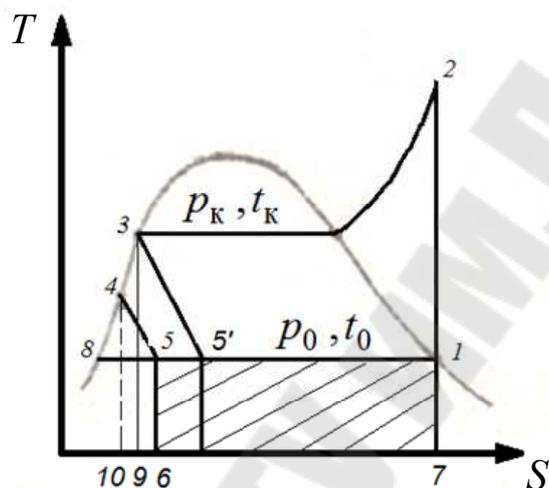


Рис. 8.2. Цикл одноступенчатой парокомпрессионной установки

Основными величинами, характеризующими работу установки, являются удельная массовая холодопроизводительность  $q_0$  и холодильный коэффициент  $\varepsilon$ :

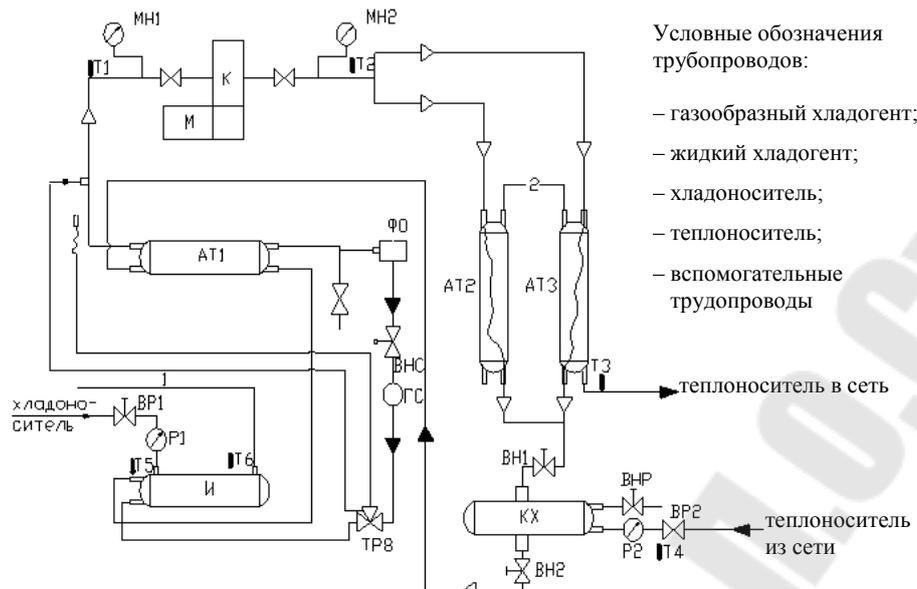
$$q_0 = h_1 - h_5, \text{ кДж/кг}; \quad (8.1)$$

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_k}, \quad (8.2)$$

где  $l_k = h_2 - h_1$  – удельная работа компрессора, кДж/кг.

### Порядок выполнения работы

Так как в схеме испытываемой холодильной установки (рис. 8.3) имеется регенератор для перегрева паров хладагента перед всасыванием и переохлаждения жидкости после конденсатора, то цикл ее будет иметь некоторые отличия от цикла, представленного на рис. 8.2.



Условные обозначения трубопроводов:

- газообразный хладагент;
- жидкий хладагент;
- хладоноситель;
- теплоноситель;
- вспомогательные трубопроводы

Рис. 8.3. Схема опытной холодильной установки:  
 АТ1, АТ2, АТ3 – теплообменники регенеративный, поточный, конвективный; ВН1, ВН2 – клапаны запорные сильфонные; КХ – конденсатор; ВНР – термометры; ТРВ – вентиль терморегулирующий; БНС – вентиль мембранный; Ф0 – осушитель-фильтр; И – испаритель; М – электродвигатель; К – компрессор; МН1, МН2 – манометры; ВП1, ВП2 – вентили ручной регулировки расхода воды

## Обработка опытных данных

Результаты измерений занести в табл. 8.1.

Таблица 8.1

### Результаты измерений

Номер пунктов	$p_0$	$p_k$	$t'_{в.п},$ °C	$t''_{в.п},$ °C	$t'_{в.к},$ °C	$t''_{в.к},$ °C	$G''_в,$ кг/с	$G^к_в,$ кг/с	$t_{вс},$ °C	$t_{сж},$ °C	$t_п,$ °C

1. Удельная массовая холодопроизводительность:

$$q_0 = h'_1 - h_5, \text{ кДж/кг.} \quad (8.3)$$

2. Удельная работа компрессора:

$$l_k = h_2 - h'_1, \text{ кДж/кг.} \quad (8.4)$$

3. Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = q_0 / l_k. \quad (8.5)$$

4. Тепловая нагрузка конденсатора

$$Q_k = G_B^k C_B (t'_{B,K} - t''_{B,K}), \text{ кВт.} \quad (8.6)$$

5. Тепловая нагрузка испарителя:

$$Q_{\text{и}} = G_B^{\text{и}} C_B (t'_{B,\text{и}} - t''_{B,\text{и}}), \text{ кВт.} \quad (8.7)$$

6. Расход хладагента:

$$G = Q_{\text{и}} / q_0, \text{ кг/с.} \quad (8.8)$$

7. Объемная подача компрессора:

$$V_k = G v'_1, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (8.9)$$

где  $v'_1$  – удельный объем хладагента в точке 1'.

8. Мощность компрессора в идеальном изоэнтропном процессе:

$$N_k = G l_k, \text{ кВт.} \quad (8.10)$$

9. Эксергетический КПД установки:

$$\eta_e = \varepsilon \frac{T_0 T_{B,\text{и}}^{\text{ср}}}{T_0}, \quad (8.11)$$

где  $T_{B,\text{и}}^{\text{ср}}$  – средняя температура воды в испарителе, К.

10. Тепловая нагрузка переохладителя, кВт:

$$Q_{\text{п}} = G(h_3 - h_4). \quad (8.12)$$

По полученным данным необходимо построить зависимости:  
 $\varepsilon = f(t_k, t_0)$ ,  $\eta_e = f(t_k, t_0)$ .

### Контрольные вопросы

1. Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной установки.

2. Цикл парокомпрессионной холодильной установки в  $T$ – $S$ - и  $p$ – $h$ -диаграмме.

3. К чему приводит переохлаждение жидкого хладагента после конденсатора?

4. К чему приводит перегрев пара хладагента перед компрессором?

4. Основные параметры, характеризующие работу парокомпрессионной холодильной установки.

## Лабораторная работа № 9

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

**Цель работы:** изучение конструкции и принципа действия парокompрессионного теплового насоса; испытание теплового насоса и определение его основных характеристик.

#### Теоретические сведения

Тепловой насос (ТН) – устройство для переноса тепловой энергии от теплоотдатчика с низкой температурой (чаще всего окружающей среды) к теплоприемнику с высокой температурой. Для работы ТН необходима затрата внешней энергии (например, механической, электрической, химической).

Парокompрессионные и абсорбционные ТН для осуществления термодинамических циклов потребляют различные виды энергии: ПТН – механическую (электрическую); АБТН – тепловую.

Для сравнения эффективности различных типов ТН необходим общий показатель. Таким показателем может быть удельный расход топлива на выработку теплоты или коэффициент его использования.

Энергетическая эффективность ПТН характеризуется коэффициентом преобразования энергии:

$$\mu_{\text{ПТН}} = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{к}}}, \quad (9.1)$$

где  $Q_{\text{п}}$  – произведенная теплота;  $Q_{\text{к}}$  – мощность в тепловом эквиваленте, затраченная на привод компрессора.

Действительный коэффициент преобразования реально цикла можно рассчитать по формуле

$$\mu_{\text{ПТН}} = \mu_{\text{ид}} \varphi, \quad (9.2)$$

где  $\mu_{\text{ид}}$  – коэффициент преобразования идеального цикла Карно;  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий реальные процессы, осуществляемые рабочим телом в ПТН:

$$\mu_{\text{ид}} = \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} - T_0}, \quad (9.3)$$

где  $T_{\text{к}}$  и  $T_0$  – температура кипения и конденсации рабочего тела;

$$T_k = 273 + (t_{w2} + (5 \div 10)), \text{ К}; \quad (9.4)$$

$$T_0 = 273 + (t_{s2} + (2 \div 4)), \text{ К}, \quad (9.5)$$

где  $t_{w2}$ ,  $t_{s2}$  – температуры горячего источника теплоты (нагреваемой воды) на выходе из конденсатора и холодного источника теплоты (охлаждаемой воды) на выходе из испарителя ПТН.

Практические значения  $\varphi$  составляют 0,55–0,70, при этом более низкие значения соответствуют более крупным агрегатам.

Эффективность АБТН характеризуется коэффициентом трансформации:

$$\mu = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{г}}}, \quad (9.6)$$

где  $Q_{\text{п}}$  – количество произведенной теплоты;  $Q_{\text{г}}$  – количество высокотемпературной теплоты, подведенной к генератору ТН.

### Порядок выполнения работы

Схема и описание опытной установки (см. лабораторную работу № 2).

1. Произвести визуальный осмотр установки.
2. Открыть вентиль слива воды в канализацию.
3. Включить подачу воды в установку. Убедиться в отсутствии течи.
4. Соответствующими вентилями открыть подачу хладагента в испарители и конденсаторы, с которыми будет осуществляться работа. Осуществить подачу воды в работающие испарители и конденсаторы. *Не начинать работу на установке с теплообменниками, в которые подается хладагент, но не подается вода*, так как это ведет к поломке!
5. Включить установку в сеть. Включить прибор ТРМ 138.
6. Запустить компрессор.
7. Подождать, пока установка выйдет на режим работы (15–20 мин).
8. Произвести измерения температуры воды на входе (выходе) из теплообменников, давления хладагента на входе (выходе) из компрессора, мощности компрессора, температуры хладагента на входе в компрессор и на входе в ресивер, расхода воды через теплообменники.

9. Выключить компрессор, прибор ТРМ 138 и отключить установку от сети.

10. После выключения установки вода должна циркулировать в теплообменниках не менее 15 мин во избежание замораживания трубок испарителя.

11. Отключить подачу воды, закрыть вентиль на сливе воды в канализацию.

12. При смене теплообменников в опыте необходимо дать установке время для слива хладагента (не менее часа).

### Обработка результатов измерения

1. В ходе измерения получить следующие данные: температура воды на входе (выходе) из испарителя  $t'_{и}$ ,  $t''_{и}$ ; температура воды на входе (выходе) из испарителя:  $t'_к$ ,  $t''_к$ ; давление хладагента на входе (выходе) из компрессора  $p_0$ ,  $p_к$ ; мощность компрессора  $N_к$ ; температура хладагента на входе в компрессор  $t_{вс}$ ; температура хладагента на входе в ресивер  $t_p$ ; расход воды через испаритель (конденсатор)  $G_{и}$ ,  $G_к$ .

2. По параметрам хладагента (R134a) строим цикл теплового насоса в  $\lg p-h$ -координатах.

3. По  $\lg p-h$ -диаграмме определяем энтальпии характерных точек:  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3 = h_4$ .

4. Определяем удельные характеристики цикла:

а) работа компрессора, кДж/кг:

$$l_к = h_2 - h_1; \quad (9.7)$$

б) теплота, полученная в конденсаторе, кДж/кг:

$$q_к = h_2 - h_3; \quad (9.8)$$

в) теплота, подводимая от охлаждаемого объекта в испарителе, кДж/кг:

$$q_0 = h_1 - h_3; \quad (9.9)$$

г) теоретический коэффициент преобразования теплоты:

$$\mu_{\text{пттн}} = \frac{q_к}{l_к}. \quad (9.10)$$

4. Тепловая мощность конденсатора:

$$Q_k = c_v G_k (t_k'' - t_k'), \quad (9.11)$$

где  $c_v$  – теплоемкость воды, кДж/кг.

5. Действительный коэффициент преобразования теплоты:

$$\mu_{\text{птт}} = \frac{Q_k}{N_k}. \quad (9.12)$$

6. Сравнить теоретический и действительный коэффициент преобразования теплоты, сделать выводы об эффективности применения данного теплового насоса.

### Контрольные вопросы

1. Определение теплового насоса.
2. Классификация тепловых насосов.
3. Конструкция парокомпрессионного теплового насоса.
4. Энергетическая эффективность тепловых насосов.
5. Построение циклов тепловых насосов в  $T$ – $S$ -диаграмме.
6. Построение циклов тепловых насосов в  $p$ – $h$ -диаграмме.
7. Области применения тепловых насосов.
8. Источники низкопотенциальной теплоты для тепловых насосов.

## Литература

1. Промышленные теплообменные процессы и установки / А. М. Бакластов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
2. Бакластов, А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплообменных установок / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, П. Г. Удыма. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 336 с.
3. Бакластов, А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок / А. М. Бакластов. – М. : Энергия, 1970. – 567 с.
4. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г. Н. Данилова [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1973. – 328 с.
5. Лебедев, Л. Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / Л. Д. Лебедев, А. А. Щукин. – М. : Энергия, 1970. – 408 с.
6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 552 с.

## Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Испытание рекуперативных кожухотрубчатых теплообменных аппаратов .....</i>	<i>3</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Изучение тепловых режимов работы рекуперативных кожухотрубчатых конденсаторов .....</i>	<i>8</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Изучение тепловых режимов работы рекуперативных кожухотрубчатых испарителей .....</i>	<i>14</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Изучение процессов тепло- и массообмена в скруббере.....</i>	<i>17</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование кинетики сушки твердых материалов при конвективном способе подвода теплоты ....</i>	<i>23</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование работы ректификационных колонн непрерывного действия .....</i>	<i>28</i>
<i>Лабораторная работа № 7. Изучение процесса выпаривания и определение температурных депрессий раствора .....</i>	<i>34</i>
<i>Лабораторная работа № 8. Испытание парокомпрессионной холодильной установки .....</i>	<i>42</i>
<i>Лабораторная работа № 9. Изучение работы парокомпрессионного теплового насоса .....</i>	<i>46</i>
<i>Литература .....</i>	<i>50</i>

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

# **ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ**

**Практикум  
по выполнению лабораторных работ для студентов  
специальностей 1-43 01 05 «Промышленная  
теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая  
эксплуатация энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

Составители: **Овсянник** Анатолий Васильевич  
**Шаповалов** Александр Валерьевич  
**Макеева** Екатерина Николаевна

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Т. Н. Мисюрова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 14.04.20.

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

Цифровая печать. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 3,35.

Изд. № 25.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель